

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE TRES TÉCNICAS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS EN EL ROBOT PIONEER 3-DX UTILIZANDO COPPELIASIM-SIMULINK

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

GUERRA LANDÁZURI GABRIEL FERNANDO

gabriel.guerra01@epn.edu.ec

MEDINA HERRERA LUIS FERNANDO

luis.medina01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PhD.

oscar.camacho@epn.edu.ec

Quito, julio 2021

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Gabriel Fernando Guerra Landázuri y Luis Fernando Medina Herrera bajo mi supervisión.

ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PhD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Gabriel Fernando Guerra Landázuri y Luis Fernando Medina Herrera declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Gabriel Fernando Guerra Landázuri

Luis Fernando Medina Herrera

AGRADECIMIENTO

A mis padres Luis y Meri por haberme apoyado siempre y enseñado el valor de la responsabilidad en todas las cosas, por más simples que estas sean. Por haberme ayudado siempre con todo lo que pudieron y guiarme en mi camino cuando lo necesitaba.

A mi hermana Daniela por ser mi amiga incondicional y compañera en mis alegrías y mis tristezas.

A toda mi familia por siempre celebrar mis logros como los suyos y por verme siempre con ojos de cariño y confianza.

A Isabel por todos los hermosos momentos en nuestra vida universitaria.

A Ricardo por ser siempre mi mejor amigo. En la buenas, en las malas y en todas las que hagan falta. Gracias por ser mi hermano.

A Gabriel por seguir este arduo y duro camino juntos. Finalmente lo hemos logrado.

A todos los amigos la universidad que un día recordaré con cariño y volverán a mi mente todas las aventuras, locuras y pesares que pasamos juntos.

Y finalmente a todos mis profesores que me enseñaron que cualquiera puede aprender. Pero solo aprende el que se lo propone a hacerlo. En especial al Doctor Óscar Camacho por haber sido un excelente maestro y amigo que nos extendió la mano para realizar este proyecto final. Un abrazo.

Luis

AGRADECIMIENTO

A mis padres Jorge y Virginia, por su apoyo y amor incondicional, por su trabajo y sacrificio a lo largo de los años que me han permitido llegar lejos. Por los consejos, valores y principios que siempre me han inculcado y por siempre motivarme a ser una mejor versión de mí mismo.

A mi hermano Jorge y mi hermana Daniela por su apoyo, compañía y sabiduría compartida a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todos mis amigos que siempre me ayudaron de manera desinteresada y con quienes compartí una de las mejores etapas de mi vida, enseñándome que trabajando en grupo se pueden lograr grandes cosas.

A Luis por su amistad, apoyo y dedicación que ha hecho posible que culminemos este trabajo. ¡Lo logramos amigo!

A toda mi familia por siempre estar pendiente de mi bienestar y alegrarse con cada objetivo logrado en mi vida.

Por último, quiero agradecer a los docentes que no solo me enseñaron sobre mi carrera, sino que inculcaron en mí el gusto por siempre querer aprender más. Recalcando a Oscar Camacho, quien nos brindó todo su experiencia y apoyo, guiándonos en el desarrollo de este trabajo.

Gabriel

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 ALCANCE	4
1.3 MARCO TEÓRICO.....	5
1.3.1 CLASIFICACIÓN DE ROBOTS	5
1.3.2 ROBOTS MÓVILES.....	9
1.3.3 AMBIENTES DE OPERACIÓN.....	12
1.3.4 APLICACIONES DE ROBOTS MÓVILES.....	13
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1. ROBOT UNICICLO.....	17
2.1.1. ESTRUCTURA DEL ROBOT UNICICLO.....	17
2.1.2. PIONEER 3-DX.....	18
2.1.3. Modelo Cinemático.....	19
2.1.4. Modelo Dinámico.....	20
2.2. ENTORNO SIMULINK/COPPELIASIM.....	21
2.3. APROXIMACIÓN A MODELO DE PRIMER ORDEN CON RETARDO.....	23
2.4. CONTROLADOR CINEMÁTICO.....	25
2.5. CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES (SMC).....	26
2.5.1. FUNDAMENTOS.....	26
2.5.2. CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES DINÁMICOS (DSMC).....	29
2.5.3. CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES DUAL (DUAL-SMC).....	32
2.6. EVASIÓN DE OBSTÁCULOS	35
2.7. DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	38
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
3.1. TRAYECTORIA CIRCULAR.....	42

3.2.	TRAYECTORIA LEMNISCATA.....	49
3.3.	TRAYECTORIA CUADRADA	56
3.4.	EVASIÓN DE OBSTÁCULOS	63
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
4.1.	CONCLUSIONES.....	64
4.2.	RECOMENDACIONES.....	65
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	ANEXOS	70

RESUMEN

En este trabajo de titulación se realiza el diseño e implementación de tres controladores basados en modos deslizantes aplicados en el seguimiento de trayectorias de un robot Pioneer 3-DX. Los controladores basados en superficies deslizantes se caracterizan por ser soluciones robustas frente a sistemas no lineales. Además, como se ha demostrado en otros trabajos [1], presentan un gran rendimiento cuando el modelo varía debido al envejecimiento.

Existen algunas variantes del control por modos deslizantes [2] dentro de estas se encuentra, el Control por Modos Deslizantes Dinámico (DSMC) y el Control por Modos Deslizantes Dual (Dual-SMC). El DSMC busca combinar un controlador por modos deslizantes con una estructura de Modelo Interno (IMC) [3]. Para mejorar la respuesta ante retardos del sistema. Mientras que, el Dual-SMC permite la conmutación entre un controlador por modos deslizantes basado en una superficie PID y uno basado en una superficie PD [4]. Esto con el propósito de agilizar la respuesta del proceso y mejorar la etapa transitoria.

Los tres controladores mencionados anteriormente son implementados en el robot de investigación Pioneer 3-DX [5] para el seguimiento de trayectorias definidas por un “robot virtual”. El Pioneer 3-DX es un robot móvil unicycle utilizado para desarrollar trabajos de investigación y diseño de controladores. La estructura de control y el sistema de seguimiento de trayectorias es simulado mediante un Software in Loop (SIL) utilizando los softwares de Matlab-Simulink [6] y CoppeliaSim [7].

PALABRAS CLAVE: Control por modos deslizantes, seguimiento de trayectorias, etapa transitoria, robot unicycle, Software in Loop.

ABSTRACT

The present document shows the design and implementation of three controllers based on a Sliding Surface approach. These controllers are used for trajectory tracking applied in a Pioneer 3-DX robot. The controllers based on sliding surfaces are characterized by being robust solutions to non-linear systems. In addition, as shown in other works [1], they show great performance when the model varies due to aging.

There are some variants of the SMC [2]. Some of them are the Dynamic Slide Mode Control (DSMC) and the Dual Slide Mode Control (Dual-SMC). The DSMC seeks to combine a Sliding Mode Controller with an Internal Model structure (IMC) [3]. To improve the response to system delays. Whereas the Dual-SMC allows switching between a Sliding Mode Controller based on a PID surface and one based on a PD surface [4]. This is to speed up the response of the process and improve the transitory stage.

The three controllers mentioned above are implemented in the research robot Pioneer 3-DX [5] for tracking defined trajectories traced by a “virtual robot.” The Pioneer 3-DX is a unicycle mobile robot used to carry out controller design and research work. The control structure and the trajectory tracking system is simulated by Software in Loop (SIL) using Matlab-Simulink [6] and CoppeliaSim [7] software.

KEYWORDS: Control by sliding modes, trajectory tracking, transient stage, unicycle robot, Software in Loop.

1. INTRODUCCIÓN

Cada vez es más común la automatización de tareas en la industria. Esto significa que una o varias labores realizadas por el ser humano son reemplazadas por máquinas o robots. Esto permite que éstas se realicen más deprisa y por un menor costo [8]. Además, esto significa una mayor eficacia para la industria.

Las principales tareas que están siendo automatizadas son las que requieren algún tipo de esfuerzo físico, representan algún riesgo para el operador, o requieren de personal altamente entrenado para realizarse. Cuando estas tareas son reemplazadas por un robot se elimina el riesgo para los empleadores, permite que las tareas puedan ser ejecutadas indefinidamente [9] y habilita que, las labores que necesitan de personal estrictamente entrenado puedan llevarse a cabo en cualquier momento.

Esto ha generado que el uso de los robots se popularice en las industrias. Diferentes tipos de robots como: robots móviles, manipuladores y vehículos aéreos se han vuelto los más utilizados. Estos llevan a cabo diferentes tareas como transporte de objetos, ensamblaje y monitoreo de procesos, entre otros. Constantemente se encuentran en desarrollo nuevos tipos de robots, así como, la programación incorporada dentro de ellos. Permitiéndoles llevar a cabo cada vez labores más complejas [10].

En este trabajo nos concentraremos en los robots móviles, de tracción por ruedas, conocidos como robots unicycle. Más adelante en este capítulo ahondaremos en el tipo de robots móviles que existen. en la industria de transporte y almacenamiento los robots móviles son muy utilizados. Sus principales funciones son la movilización de objetos y navegación dentro de las casas de almacenamiento. Este tipo de Industrias han utilizado vehículos operados manualmente o vehículos automáticos guiados (VAG) [8]. Estos vehículos se caracterizan porque sólo pueden operar en ambientes o áreas restringidas, esto quiere decir que no se permite el ingreso de personas no autorizadas por el riesgo de accidente al operar con estos vehículos. Estos vehículos también suelen encontrarse dentro de rieles para prevenir que se salgan de una trayectoria preestablecida. la ventaja de utilizar este tipo de vehículos es que no necesitan un control y por lo tanto su costo es menor comparado a otros vehículos que sí lo necesitan. La incorporación de los VAG para su colaboración con los humanos es bastante limitada y que las personas que operen este tipo de robot o que se encuentren trabajando dentro de su ambiente deberán tener un nivel de entrenamiento. Sin embargo, esto no asegura que no existirán ningún riesgo de accidente.

Por otro lado, existen otro tipo de vehículos conocidos como robots móviles autónomos (AMR) [11]. Este tipo de robot se caracteriza por tener sensores y un sistema de control que le permite identificar elementos que se encuentran en su entorno. Con estas herramientas es posible implementar un sistema de seguridad programado en el robot. Además, el robot puede circular en un ambiente dinámico, esto quiere decir, que el robot no necesita rieles ni líneas para seguir una trayectoria. Y es capaz de detectar obstáculos o personas que se encuentren transitando en el área. Esto lo convierte en un robot mucho más seguro que los VAG. Y es por eso, que la implementación de una robótica colaborativa se puede llevar a cabo con este tipo de herramientas. Los AMR pueden representar un costo más alto que los VAG, sin embargo, su costo de producción cada vez se está volviendo más barato y próximamente reemplazarán por completo a los vehículos automáticos guiados

La robótica colaborativa es la capacidad de poder combinar los esfuerzos realizados por una máquina y un hombre al realizar una tarea en específico. Esto brinda una mayor efectividad al momento de cumplir algunas labores. Ya que, el robot puede llevar a cabo las labores físicas o tediosas para el ser humano, mientras que éste puede encargarse de labores más complejas o demandantes que el robot no lo puede hacer, por ejemplo: identificar los elementos defectuosos dentro de un lote o procesar nuevas órdenes de envío.

Esta es una de las razones por la cual es importante que un sistema de control esté presente dentro de los robots que operan en la industria. La seguridad es uno de los factores más importantes a considerar en los vehículos que operan juntamente con humanos. Con la automatización este tipo de vehículos pueden operar por períodos casi indefinidos. Y el proceso de producción tiene menos detenciones. Los algoritmos de control influyen mucho en la producción si es que estos algoritmos son capaces de subir o disminuir los tiempos de producción.

En la industria de transporte y almacenamiento se utilizan muchos robots móviles para transportar paquetes desde las bodegas hacia el área de envíos. Supongamos que una empresa utiliza 80 AMR para transportar los envíos de una bodega a otra, un robot realiza alrededor de 200 viajes al día y cada viaje le toma alrededor de 5 minutos. Si es que el algoritmo de control puede hacer que cada viaje reduzca su tiempo en 5 segundos. Los robots podrán realizar 272 viajes más al día y 8160 viajes al mes.

Este pequeño ejemplo indica como una ligera mejora en el algoritmo de seguimiento de los robots les permite tener grandes resultados en la producción.

El seguimiento de trayectorias propone que un robot debe seguir una trayectoria trazada en un tiempo determinado. Existen varios esquemas de control dependiendo del robot que se encuentre realizando el seguimiento. En [1] se propone el seguimiento utilizando estrategias de control tradicionales como un controlador PI, y otros esquemas como el SMC y Álgebra Lineal por lo métodos de Euler y Trapezoidal [12]. En [13] se propone el control de seguimiento mediante el uso del control LAMDA Adaptativo. En [14] proponen el uso de controladores difusos. Y consecuentemente existen más trabajos que utilizan otras estructuras de control para realizar seguimiento de trayectoria.

En los siguientes capítulos se propone el diseño de controladores DSMC y Dual SMC para el seguimiento de trayectorias de un robot Pioneer 3-DX. En el capítulo dos se implementó un algoritmo de evasión de obstáculos para ingresar perturbaciones en el sistema. En el capítulo tres se presentan los resultados de las simulaciones realizadas y se compara el desempeño de los controladores propuestos mediante los índices de rendimiento ITSE y TVu.

Se desarrolló una interfaz gráfica en App Designer de Matlab para la interacción con la simulación y una visualización correcta de los resultados.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Diseñar y simular tres técnicas de control para el seguimiento de trayectorias en el robot Pioneer 3-DX utilizando Coppeliasim-Simulink

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una recopilación bibliográfica de: los diferentes esquemas utilizados para el control de trayectoria en robots móviles, los fundamentos de control por modos deslizantes duales y dinámicos.
- Diseñar y sintonizar un esquema de control por modos deslizantes dual y dinámico para el seguimiento de trayectorias de robots móviles.

- Simular el seguimiento de trayectorias mediante el uso de un robot móvil Pioneer 3-DX, utilizando el software de CoppeliaSim en conjunto con Simulink, para formar un esquema de control Software in Loop.
- Probar y comparar los esquemas de control mencionados, contra un esquema general SMC, a través de la cuantificación de los índices de desempeño, ITSE y TVu, sobre pico y tiempo de establecimiento.
- Desarrollar una interfaz gráfica en App Designer de Matlab para poder seleccionar el controlador y la trayectoria deseada y poder visualizar los índices de desempeño, ITSE, TVU.

1.2 ALCANCE

- Se realizará una recopilación de información sobre los modelos cinemáticos y dinámicos utilizados en el seguimiento de trayectorias para robots móviles, para obtener un modelo de orden reducido con tiempo muerto.
- Se realizará un estudio de los fundamentos del control por superficies deslizantes dual y dinámica, para aplicarlo en el seguimiento de trayectorias de robots móviles.
- Se diseñará un esquema de control por modos deslizantes duales (Dual-SMC) y uno por modos deslizantes dinámico (DSMC) a partir del modelo de primer orden reducido con retardo para su aplicación en el sistema propuesto.
- Se simulará el seguimiento de trayectorias: circular, cuadrada y lemniscata con los esquemas de control propuestos. Mediante el uso de Simulink y CoppeliaSim (V-REP), para comprobar el funcionamiento de los controladores.
- Se compararán el rendimiento de los controladores propuestos frente a un esquema SMC general, mediante la cuantificación de los índices de desempeño ITSE, TVu, sobre pico y tiempo de establecimiento.
- Se desarrollará una interfaz gráfica mediante el uso de App Designer de Matlab, para poder seleccionar el controlador y la trayectoria de la simulación, y visualizar los índices de desempeño ITSE y TVu.

1.3 MARCO TEÓRICO

Esta sección abarca el desarrollo de la fase teórica y la recopilación de la información necesaria para el entendimiento de la robótica y sus diferentes ambientes de operación. Donde justamente se plantea la base del problema de este trabajo y el porqué de la solución al implementar sistemas de control para la integración de robots móviles en ambientes con humanos.

Empieza con una breve clasificación de los robots, recabando diferentes ejemplos y modelos reales utilizados en la industria e investigación. La clasificación de los robots puede establecerse según varios criterios. Sin embargo, el tema de interés para este trabajo se enfoca en la clasificación de los robots móviles, cuáles son los más utilizados y en qué ambientes estos operan. La implementación de estos robots en la industria y las diferentes aplicaciones actuales representa un avance increíble en la tecnología. Es pertinente finalizar con la exposición de algunos ejemplos, donde la implementación de los robots móviles es una realidad y transformará la industria en menos tiempo de lo que se espera.

1.3.1 CLASIFICACIÓN DE ROBOTS

Existen muchos autores que intentan establecer una definición de la robótica. Algunos la describen como la ciencia que se encarga de automatizar a los sistemas basados en estructuras mecánicas, mediante articulaciones y dotándolos de un cierto nivel de inteligencia [15]. Sin embargo, ahora ingresamos en el inconveniente de definir la inteligencia en una máquina. Existen otros autores [16] que definen a la robótica como una mezcla de disciplinas, entre ellas se encuentra: la electrónica, informática, mecánica, inteligencia artificial, sistemas de control y muchas otras que buscan integrarse para la creación de un sistema automático capaz de llevar a cabo determinadas tareas. Ambas definiciones son válidas. Pero; si podemos concordar en algo, es que la robótica es una rama bastante extensa de la tecnología que abarca diferentes tipos de robots, algoritmos de control y aplicaciones. Esta se encuentra en pleno desarrollo, siempre estará creciendo y fusionándose con otras tecnologías. Es por eso la dificultad en definirla. Hace algunos años atrás un robot se limitaba a una máquina que podía moverse y realizar ciertas acciones

básicas. Hoy en día un robot puede realizar casi cualquier acción imaginable y adaptarse a formas que nunca pensamos que llegarían.

Como lo hemos visto, la robótica es una rama muy extensa. Donde cada campo de estudio es igual de interesante que otro. Sin embargo, es muy importante su clasificación. Ya que nos permite delimitar qué tipo de robots se van a manejar. De igual manera, existen muchas diferentes clasificaciones de los robots. En este trabajo mencionaremos algunos de los tipos de robots más conocidos sin una clasificación establecida, debido a que más adelante nos enfocaremos en los robots móviles, a pesar de esto existen otros tipos de robots que pueden ser revisados en la recopilación bibliográfica de este trabajo.

- *Robots Manipuladores*

Los robots manipuladores se caracterizan por ser autómatas con un brazo robótico constituido por diferentes articulaciones. Este tipo de robots son muy utilizados en la industria automotriz y similares donde se tienen líneas de ensamblaje. Se caracterizan por su capacidad de realizar movimientos que requieran un nivel muy elevado de precisión y agilidad. Además, pueden ejercer niveles elevados de torque necesarias para mover objetos pesados. Un claro ejemplo de este tipo de robots es el IRB140-ABB [17] que es un robot manipulador de la industria ABB [18] con articulaciones rotacionales y una punta intercambiable que le permite llevar a cabo diferentes tareas, como la soldadura de partes mecánicas.

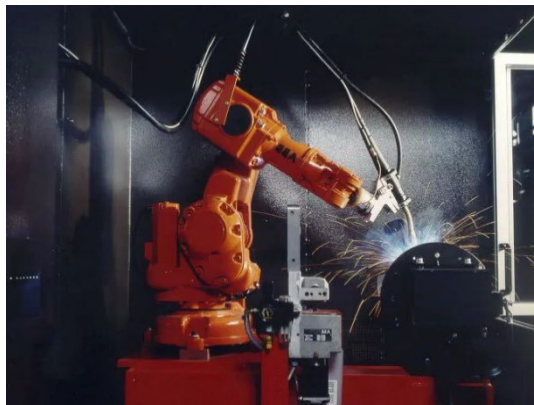


Figura 1.1. Robot manipulador IRB 140 -ABB [18]

- *Robots Humanoides*

Se conocen como humanoides a los robots diseñados para replicar la forma y movimientos del ser humano. Por definición entonces, los robots humanoides se caracterizan por tener un par de brazos, piernas y una cabeza. Este puede contar con una variedad diferente de sensores y actuadores que le permiten interactuar con sus alrededores. Un ejemplo de un

humanoide es el robot ASIMO de la compañía japonesa HONDA [19]. Este robot fue diseñado para caminar como un humano y poder interactuar de una manera cordial con personas que se encuentren en la fábrica.



Figura 1.2. Robot Humanoide ASIMO-HONDA [19]

- Robots Androides

Los androides son un tipo de robot humanoide donde su propósito principal es parecerse, en lo mayor posible, a un humano. Esto va desde su apariencia, simulando la piel y rasgos físicos. Hasta la personalidad de un humano simulando conversaciones y estados de ánimo. Estos resultados se han alcanzado mediante una recopilación exhaustiva de la psicología humana. La reconocida Prueba de Turing [20] es uno de los desafíos que enfrentan este tipo de robots. Esta prueba, en aspectos generales, se basa en pretender engañar a un ser humano que se encuentra conversando con otro. Con el desconocimiento de que está interactuando con un robot. En el año 2015 Hanson Robotics [21] presentó al público a Sophia un androide manejado a base de inteligencia artificial capaz de simular una conversación humana y recitar discursos recreados por ella de una forma fluida.

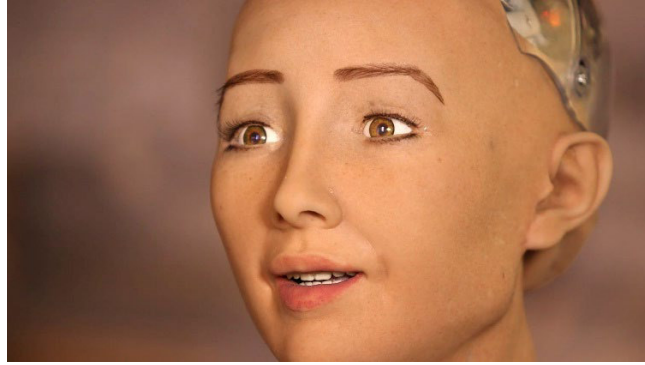


Figura 1.3. Androide Sophia Hanson Robotics [21]

- Robots Zoomórficos

Por otra parte, se conocen como robots zoomórficos a los robots que intentan replicar la apariencia y comportamiento de los animales. Este tipo de robots son diseñados con propósitos de entretenimiento o de investigación. Suelen ser utilizados para la grabación de contenido de animales salvajes en sus hábitats naturales.



Figura 1.4. Spy Hippo [22]

- Robot Aéreo

Este tipo de robots se ha popularizado en gran medida por su amplia variedad de aplicaciones. También conocidos como drones, los robots aéreos cuentan con uno o varios propulsores que les permiten elevarse y moverse por el aire. Estos se encuentran en forma de aviones, helicópteros, cuadricópteros, octocóptero, etc. También se conocen como vehículos aéreos no tripulados o por sus siglas en inglés (UAV's). Sus aplicaciones varían desde la cinematografía hasta la entrega de paquetería.



Figura 1.5. DJI Mavic Pro – Mavic [23]

1.3.2 ROBOTS MÓVILES

Existen otros tipos de robots, conocidos como robots móviles. Estos son capaces de trasladarse mediante un medio físico, ya sea tierra, agua o aire. Vienen equipados con las herramientas necesarias para poder moverse en su medio y realizar el pilotaje adecuado dentro de este.

Los robots móviles se pueden dividir según el medio por el estén trasladándose. Es decir: tierra, agua o aire. Un ejemplo de un robot móvil aéreo es justamente el DJI Mavic Pro – Mavic [23] revisado en la sección anterior. Sin embargo, nos enfocaremos en el estudio de los robots móviles terrestres por practicidad del trabajo propuesto.

Dentro de los robots móviles terrestres estos se dividen según su sistema de locomoción. Esto se refiere al mecanismo móvil utilizado para desplazarse sobre una superficie. Dentro de esta categoría se encuentran divididos de la siguiente manera:

- Locomoción por Patas

En esta categoría usualmente se encuentran los robots zoomórficos. Ya que utilizan como sistema de locomoción patas o piernas accionadas por sistemas hidráulicos o motores eléctricos. Son utilizados en campos con obstáculos y terrenos irregulares. Este tipo de robots usualmente tiene un sistema de equilibrio para evitar caídas.

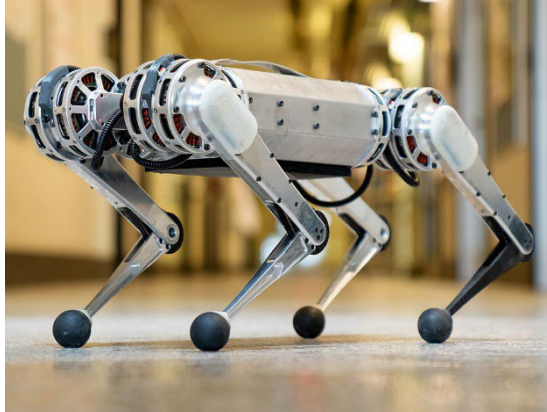


Figura 1.6. Mini Cheetah - MIT [24]

- Locomoción por Oruga

El sistema de locomoción por oruga permite que el robot pueda maniobrar en terrenos irregulares y con obstáculos. Este sistema está conformado por un grupo de engranajes interconectados por una oruga que transmite el movimiento de estos. Su popularidad se debe a que es muy eficiente para trasladar grandes pesos con menos potencia, y por su capacidad de navegación por terrenos irregulares.

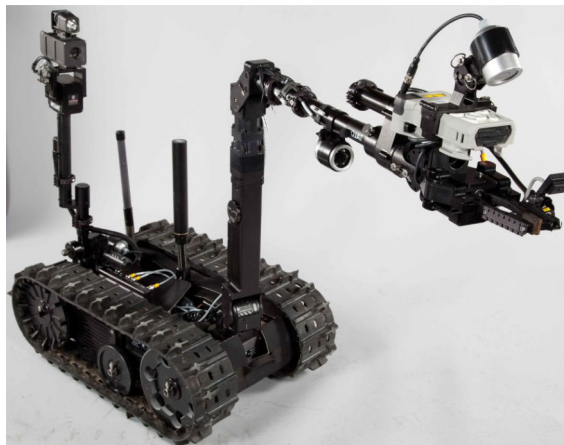


Figura 1.7. Robot Talon – Qinetiq-NA [25]

- Locomoción Omnidireccional

Este sistema de locomoción es conocido porque utiliza, como actuadores, dispositivos conocidos como ruedas suecas. Estas tienen la capacidad de moverse en dirección vertical y horizontal sin la necesidad de girar el eje de las ruedas. Esto permite eliminar la restricción no holonómica, la cual será descrita con más detalle en el siguiente capítulo.



Figura 1.8. Uranus - Carnegie Mellon University [26]

- Locomoción por Ruedas

Este tipo de robots poseen ruedas accionadas por motores. Estas ruedas pueden ser fijas o móviles y permiten que el robot se mueva sobre una superficie preferiblemente plana. Este tipo de locomoción es el más rápido dentro de los robots móviles terrestres. Dentro de esta subcategoría, el tipo de robot se define por la disposición y número de ruedas acopladas al robot: El robot cuatriciclo posee cuatro ruedas fijas accionadas por motores estáticos. Mientras que en robot triciclo posee tres ruedas una de las cuales, generalmente, es orientable centrada y le permite al robot girar hacia una dirección seleccionada. Finalmente, el robot uniciclo, con el cual se está realizando este trabajo, posee dos ruedas accionadas por motores, en adición a una tercera rueda de apoyo denominada rueda caster. Esta gira libremente sobre su propio eje y su propósito es brindar equilibrio. El robot uniciclo con el que se realizó este estudio es el modelo Pioneer 3-DX el cuál será revisado detalladamente en el capítulo siguiente.



Figura 1.9. I-BOT 3 - DAKA [27]

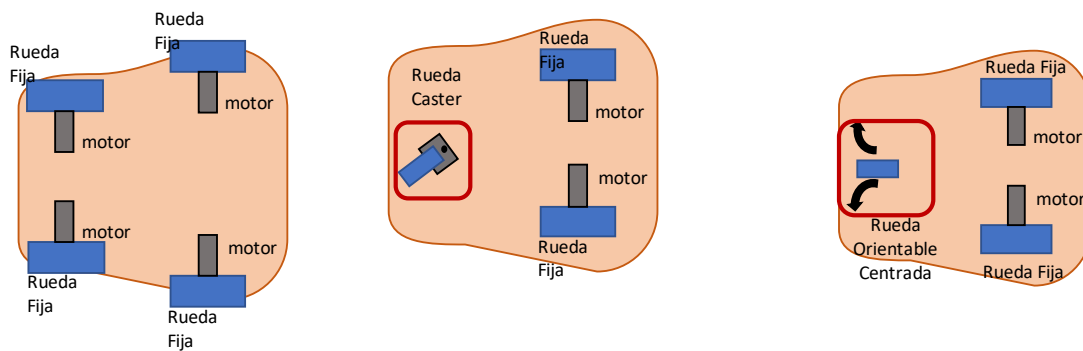


Figura 1.10. Tipo de robots móviles con tracción por ruedas.

1.3.3 AMBIENTES DE OPERACIÓN

Esta es una de las características que restringen a los robots móviles y se clasifican según los objetos que se presentan en el entorno y según el área donde va a trabajar el robot móvil.

- Según el área de trabajo

Se clasifican en entornos interiores o exteriores.

Se clasifica un entorno de trabajo interior cuando el área de trabajo se encuentra delimitada claramente por paredes y cielorraso, de igual manera, la iluminación es mayormente artificial.

Se clasifica un entorno de trabajo exterior cuando el área de trabajo no se encuentra definida claramente, de igual manera, la iluminación es mayormente natural.



Figura 1.11. Robot Optimus – Mobile Industrial Robot [28]

Un claro ejemplo de un entorno interior es un hospital, mientras que un parque o bosque demuestra claramente un área de trabajo exterior.



Figura 1.12. Robot Xaver – Fendt [29]

1.3.4 APLICACIONES DE ROBOTS MÓVILES

Como hemos revisado, la variedad y clasificación de los robots es un tema bastante extenso. De igual manera son las diferentes aplicaciones donde estos pueden encontrarse. En esta sección revisaremos algunas de las aplicaciones en las que se desenvuelven los robots móviles. Considerando a los robots móviles autónomos en ambientes dinámicos, donde se puede llevar a cabo una robótica colaborativa que garantice la seguridad de los seres humanos.

Esto con el propósito de destacar posibles integraciones de este trabajo y resaltar aplicaciones reales donde se utilizan robots móviles con sistemas de control para seguimientos de trayectoria o similares.

- Aplicación Médica

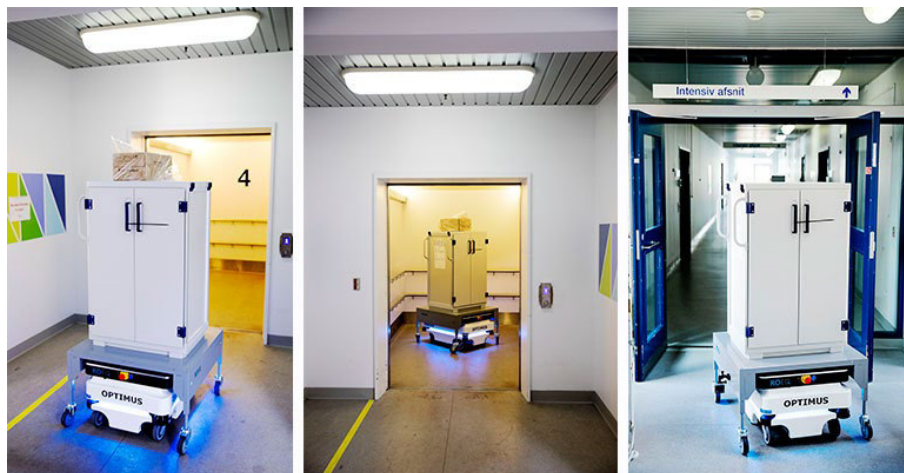


Figura 1.13. Robot MiR100 – Mobile Industrial Robot [30]

La empresa Mobile Industrial Robots colabora desde hace 2 años con el Hospital de la Universidad de Zealand en Dinamarca. Este hospital de 190000 metros cuadrados recibe diariamente entregas autónomas desde el centro de esterilización del hospital gracias al robot MiR100 o también denominado robot Optimus.

Este robot recorre más de 10km a la semana, mejorando el servicio, minimizando los espacios de almacenamiento y previniendo escasez de productos, además, debido a su capacidad de evadir obstáculos causó una rápida integración tanto con el personal del hospital, como con los pacientes. [30]

- Aplicación en Transporte y Almacenamiento

Uno de los ejemplos más populares de la integración de la robótica en la industria es la compañía estadounidense Amazon, Inc. Dentro de los servicios que ofrece esta empresa se encuentra la venta de artículos por internet. Se encuentran localizados en 14 países con más de 175 centros principales de abastecimiento [31] en todo el mundo. El desafío logístico que enfrenta Amazon se ha combatido con la ayuda de la robótica colaborativa.

El robot Kiva [32] es un robot móvil utilizado en las bodegas de la compañía. Su función principal es transportar estantes y diferentes objetos dentro de las instalaciones. Estos robots funcionan en el mismo entorno con otros empleados de la empresa, gracias a su sistema de evasión de obstáculos. Y son capaces de levantar alrededor de 340 kilogramos. La automatización de estas labores ha permitido que Amazon pueda aumentar la capacidad de cada almacén en un 50% más, además, han aumentado la eficiencia un 20% en los envíos.



Figura 1.14. Robot Kiva– Amazon Robotics [32]

- Aplicaciones Domésticas

Una de las aplicaciones que más auge ha tenido en los últimos años es la de los robots aspiradoras. La empresa iRobot, líder mundial del mercado [33], ha vendido más de 30 millones de unidades alrededor del mundo en los últimos 10 años.



Figura 1.15. Robot Roomba S9 - iRobot [33]

Estos robots cuentan con la capacidad de evadir obstáculos en ambientes dinámicos a través de sensores ultrasónicos y/o cámaras integradas, además de la capacidad de aspirar y trapear el piso de un espacio determinado.

Estos robots cuentan con la particularidad de tener 2 ruedas fijas y una rueda “caster”, es decir, es un robot móvil uniclo, enfocando nuevamente la aplicación de los controladores desarrollados en el trabajo presente.

2. METODOLOGÍA

Para este trabajo de titulación se utilizó la investigación descriptiva con carácter cuantitativo. La información recopilada se obtuvo a partir de la observación y medición de las respuestas del sistema general de control. Mediante el método deductivo se diseñaron controladores para el seguimiento de trayectoria basados en superficies deslizantes dinámicas y duales. Posterior a la simulación de las pruebas planteadas se analiza el desempeño de los controladores propuestos mediante el uso de indicadores.

Las etapas metodológicas de este proyecto de investigación son: fase teórica, fase de diseño o análisis, simulación o implementación y finalmente la fase de validación o análisis de resultados.

Se utilizó la información de otros trabajos de titulación, así como de publicaciones y artículos de revistas académicas relacionadas al control de robots móviles como fuentes secundarias de información. También se utilizó la información recopilada en libros de robótica y artículos de revistas técnicas como fuentes primarias de.

En el primer capítulo se revisaron los objetivos y el alcance del trabajo de investigación, así como las bases conceptuales establecidas en el marco teórico. Dentro de los conceptos principales, se revisó una breve introducción a la robótica, su clasificación y la caracterización de los robots móviles. Además, se identificaron los diferentes ambientes en los que puede trabajar un robot móvil. Y las aplicaciones en las que son principalmente utilizados.

Con esta presentación del robot utilizado para la investigación se presenta el segundo capítulo que abarca la etapa metodológica. Dentro de este apartado se modela matemáticamente el robot móvil tipo unicycle. Considerando los modelos cinemáticos y dinámicos y las ventajas y desventajas que considera cada uno de estos. Se presenta el robot unicycle Pioneer 3-DX utilizado en este trabajo de investigación que cuenta con un modelo establecido por reiteradas mediciones del robot real. A partir de estos modelos se han desarrollado diferentes controladores. Sin embargo, debido a la complejidad que puede acarrear la correcta estimación de un modelo dinámico se puede aproximar el modelo real a un modelo de primer orden con retardo conocido por sus siglas en inglés FOPDT (First Order Plus Dead Time).

Para la simulación del robot, pruebas de seguimiento y obtención de los modelos se utilizó el software de simulación CoppeliaSim en conjunto con Simulink para la adquisición y envío

de datos. Los dos softwares se encuentran conectados en una configuración Software in Loop¹. Con la información obtenida de los modelos se puede diseñar los controladores por modos deslizantes y sus variantes dinámicas y duales.

Finalmente se describe el algoritmo utilizado para la evasión de obstáculos y la interfaz gráfica utilizada para la interacción con la simulación y la obtención de datos.

2.1. ROBOT UNICICLO

2.1.1. ESTRUCTURA DEL ROBOT UNICICLO

Se define a un robot móvil como un robot capaz de desplazarse por un terreno de manera autónoma. Estos no se encuentran fijados a una ubicación física. Dentro de la clasificación de los robots móviles, estos se dividen según su sistema de locomoción. Los cuatro sistemas de locomoción, más utilizados, son: por patas, por oruga y por ruedas.

El robot unicycle tiene un sistema de locomoción conformado por 3 ruedas. Su estructura es bastante similar al robot triciclo con la importante diferencia que una de las ruedas del robot unicycle es una rueda giratoria, no controlada, también denominada rueda loca, mientras que las otras dos son ruedas fijas con tracción diferencial. Por otra parte, el robot triciclo cuenta de igual manera con dos ruedas fijas, pero con una tercera rueda orientable centrada que permite el giro del robot.

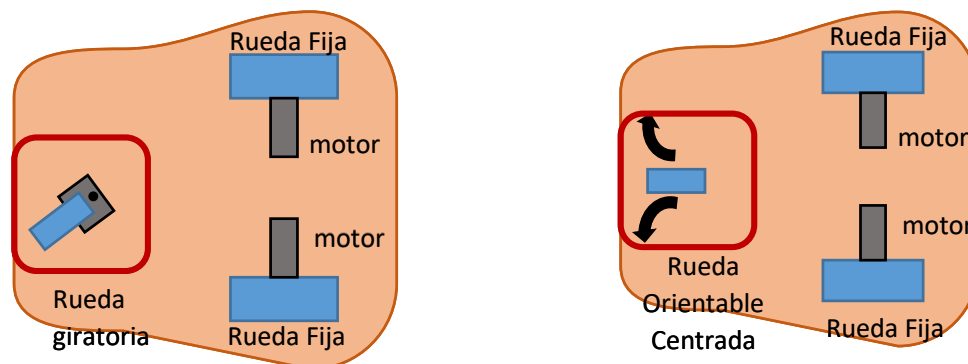


Figura 2.1. Estructura física del robot unicycle y triciclo

¹ Estructura utilizada donde dos programas computacionales intercambian información. Esta estructura puede ser utilizada para simular un sistema real de control.

2.1.2. PIONEER 3-DX

Este robot fue desarrollado por Mobilerobots². Es un robot móvil uniclo, ligero y de tamaño reducido. Es muy utilizado en laboratorios como aulas de clase. Se ha popularizado su uso para propósitos educativos y de investigación debido a su gran versatilidad y durabilidad. Cuenta con un gran número de expansiones y modificaciones. Las dimensiones físicas del Pioneer 3-DX se encuentran en la siguiente figura, dentro de estas encontraremos el diámetro y la separación de las ruedas, entre otros datos que servirán para el modelado del robot [5].

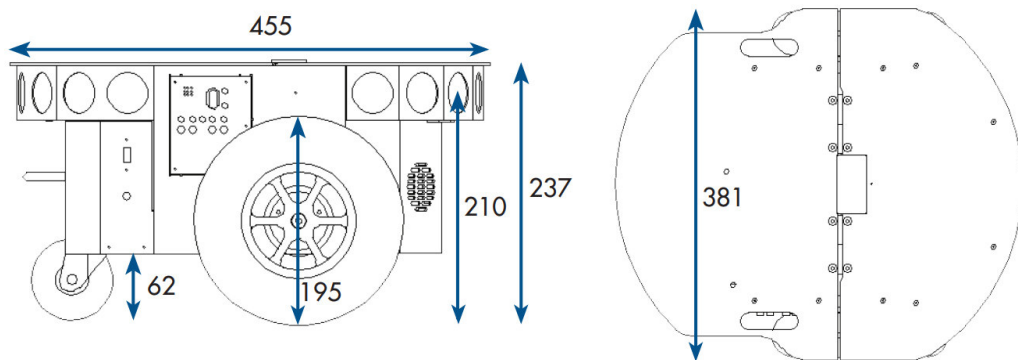


Figura 2.2. Dimensiones en milímetros del Pioneer 3-DX [5].

En el software de CoppeliaSim se encuentra el Pioneer 3-DX disponible para su simulación.



Figura 2.3. Pioneer 3-DX en Coppelia Sim [7].

² Empresa estadounidense perteneciente a la organización Omron, California, Estados Unidos. Se enfoca en la automatización y robótica industrial.

2.1.3. Modelo Cinemático

El modelo cinemático analiza matemáticamente el movimiento del robot y todas sus partes. Sin considerar las fuerzas o momentos que son ejercidos sobre él. Este modelo se genera a partir de un punto imaginario "P" colocado en el centro de las dos ruedas del robot. Considerando que el robot se está desplazando, a velocidad constante, sobre una línea recta con un ángulo de inclinación respecto al eje de coordenadas establecido. Este cuenta con una velocidad lineal u , con sus respectivas componentes u_x , u_y y una velocidad angular ω expresada como la primera derivada del ángulo de inclinación φ .

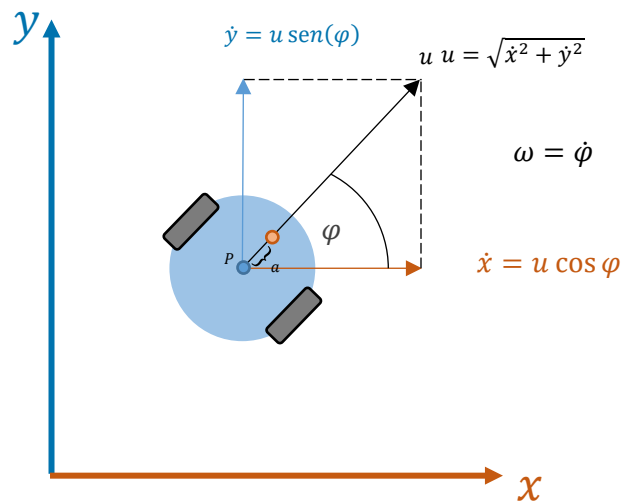


Figura 2.4. Análisis geométrico del modelo cinemático con restricción no holonómica mejorada

Mediante este análisis podemos determinar las siguientes ecuaciones que describen el sistema:

$$\dot{x} = u \cos \varphi \quad (2.1)$$

$$\dot{y} = u \sin \varphi \quad (2.2)$$

$$\dot{\varphi} = \omega \quad (2.3)$$

Sin embargo, existe una limitación de movilidad, denominada restricción no holonómica. Esta restricción explica la incapacidad del robot de moverse lateralmente, es decir, el robot tiene que hacer un giro y desplazar el punto "P" hacia adelante o hacia atrás mientras se

desplaza lateralmente. Para mejorar esta condición el punto "P" se desplaza una distancia "a" desde el centro de las llantas. A este modelo se le denomina modelo cinemático con restricción no holonómica mejorada descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x} = u \cos(\varphi) - a \omega \sin(\varphi) \quad (2.4)$$

$$\dot{y} = u \sin(\varphi) + a \omega \cos(\varphi) \quad (2.5)$$

$$\dot{\varphi} = \omega \quad (2.6)$$

Al colocar las ecuaciones anteriores en forma de vectores de estado

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & a \omega \cos(\varphi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Donde:

x, y, φ : son los estados

u, ω : son las entradas

2.1.4. Modelo Dinámico

A diferencia del modelo cinemático el modelo dinámico sí considera las fuerzas y momentos ejercidos sobre el robot. Esto quiere decir que el modelo obtenido depende de los parámetros físicos, como pesos, inercia, fricción con la superficie, entre otras. Por lo cual, el modelo dinámico presentado a continuación corresponde al robot estudiado, Pioneer 3-DX.

Este modelo se encuentra descrito por el siguiente sistema de vectores de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \varphi - a \omega \sin \varphi \\ u \sin \varphi + a \omega \cos \varphi \\ \omega \\ \frac{\theta_3^0}{\theta_1^0} \omega^2 - \frac{\theta_4^0}{\theta_1^0} u \\ -\frac{\theta_5^0}{\theta_2^0} u \omega - \frac{\theta_6^0}{\theta_2^0} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 9 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ \frac{\theta_1^0}{\theta_1^0} & \frac{1}{\theta_2^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donde

$$\theta_1^0 = 0,3984$$

$$\theta_2^0 = 0,2523$$

$$\theta_3^0 = -0,00436$$

$$\theta_4^0 = 1,0069$$

$$\theta_5^0 = 0,0073$$

$$\theta_6^0 = 1,0693$$

Son constantes correspondientes a las magnitudes físicas del robot Pioneer 3-DX

2.2. ENTORNO SIMULINK/COPPELIASIM

Para la simulación del robot se utilizó el software de CoppeliaSim en conjunto con Simulink en una configuración de Software in Loop. El Software de CoppeliaSim permite la simulación de un entorno muy similar a un entorno físico, dentro de su librería tiene varios robots comerciales disponibles para su uso. Estos robots tienen una respuesta comparable con la realidad debido al motor gráfico proporcionado. Anteriormente el software era popularmente conocido en su versión de V-Rep. Sin embargo, este fue descontinuado y actualmente se lo conoce como CoppeliaSim.

Simulink es un software de Mathworks que permite la simulación de sistemas lineales y no lineales, mediante la programación en bloques. Además, permite la implementación de código de Matlab dentro de la programación de bloques. Este lenguaje de programación permite la comunicación con otros softwares. CoppeliaSim permite la interacción con Matlab mediante la utilización de comandos Api para la interacción con los elementos simulados.

Para este trabajo se utilizó Simulink para la programación de los diferentes controladores implementados y como una herramienta de adquisición y monitoreo de datos. Mientras que el software de CoppeliaSim se encargó de la simulación del robot y el entorno mediante la recepción y envío de datos.

En el siguiente esquema se explica la forma de comunicación entre Simulink y CoppeliaSim:

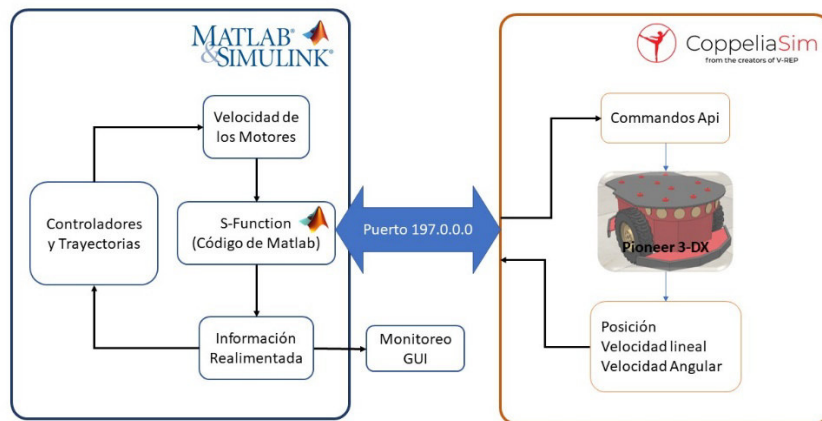


Figura 2.5. Esquema de Comunicación entre Simulink y CoppeliaSim

La comunicación bidireccional entre los dos softwares se realiza de manera síncrona. De esta forma se asegura que la información simulada por CoppeliaSim se transmita en los mismos tiempos de simulación de Simulink. Así los dos softwares recrean un entorno real y realizan los cálculos de simulación simultáneamente. El tiempo de muestreo entre los dos softwares es de 50 ms.

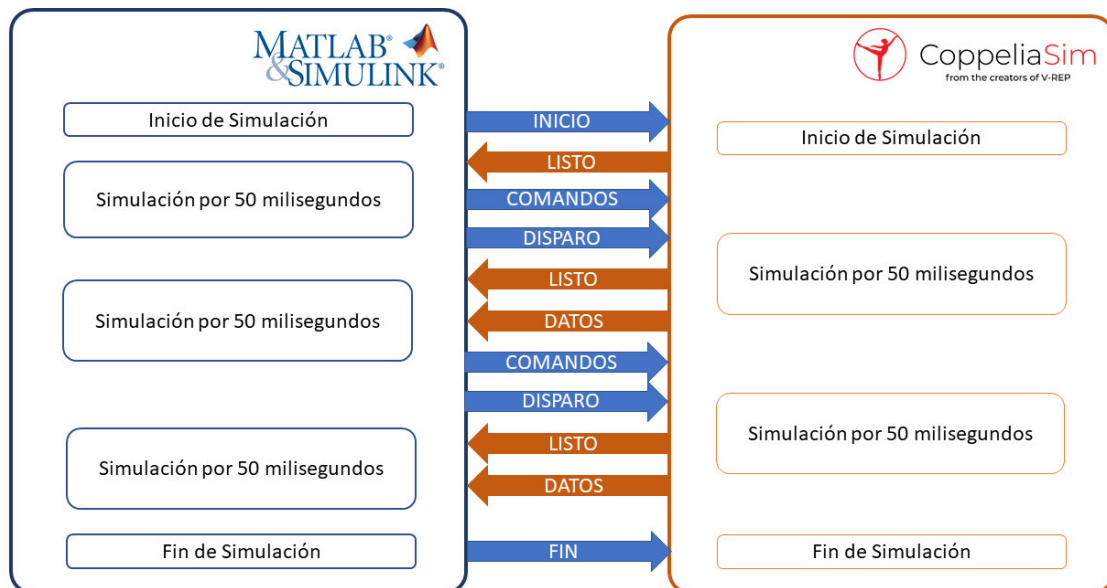


Figura 2.6. Comunicación Síncrona con un tiempo de 50ms entre Simulink y CoppeliaSim

2.3. APROXIMACIÓN A MODELO DE PRIMER ORDEN CON RETARDO

Como se observó en el apartado 2.1.4 el robot unicycle tiene un modelo dinámico relativamente complejo, además de contener términos no lineales.

Otra forma de modelar un proceso no lineal es aproximándolo a un sistema de primer orden con retardo, obteniendo de esta manera una representación lineal del modelo no lineal. Para este trabajo se realizó una aproximación del sistema de velocidad. Donde, la velocidad lineal y angular del robot son las entradas del sistema, y se consideraron como salidas los mismos valores. El modelo seleccionado para la aproximación fue la de un modelo de primer orden con tiempo muerto también conocido por sus siglas en inglés como FOPDT (First Order Plus Death Time). Es importante recalcar que el sistema se aproxima ante la respuesta de una entrada paso donde se selecciona un modelo de primer orden que tenga una respuesta similar al sistema real.

Es necesario obtener la curva de reacción del robot ante una entrada paso para poder aproximar esta respuesta a la que tendría un modelo de primer orden. Tanto para la velocidad lineal y la velocidad angular se decidió realizar un salto de velocidad donde su valor inicial no inicie en cero. Esto, para minimizar el efecto que tiene la fricción y viscosidad de la superficie en contacto como el de las ruedas, en especial, la rueda de equilibrio que puede introducir vibraciones en las mediciones.

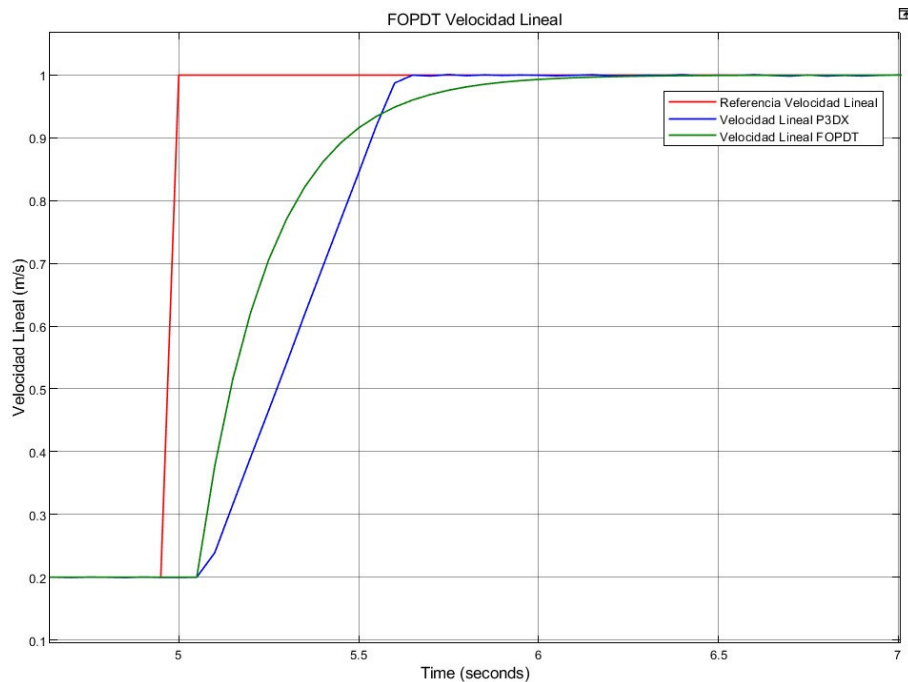


Figura 2.7. Curva de reacción de velocidad lineal del robot Pioneer 3-DX

Es importante recalcar que las entradas paso de velocidad no inician con un valor nulo, sino desde un ligero movimiento de 0.2 m/s o rad/s. Esto se debe a que, cuando el robot se encuentra en reposo, este debe vencer la fricción inicial y la rueda de equilibrio debe alinearse en el sentido que se está moviendo el robot.

Los modelos se obtienen a partir de la curva de reacción mediante el método de Smith. En este método se obtienen los tiempos cuando el sistema se encuentra al 28.3% y 63.2% de su valor máximo. Con esta información se aplican las siguientes fórmulas:

Y el sistema equivalente se obtiene mediante:

$$K = \frac{\Delta Out}{\Delta In} \quad (2.9)$$

$$\tau = \frac{3}{2} * (t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) \quad (2.10)$$

$$t_0 = t_{63.2\%} - \tau \quad (2.11)$$

$$G(s) = K \frac{e^{-t_0 s}}{1 + \tau s} \quad (2.12)$$

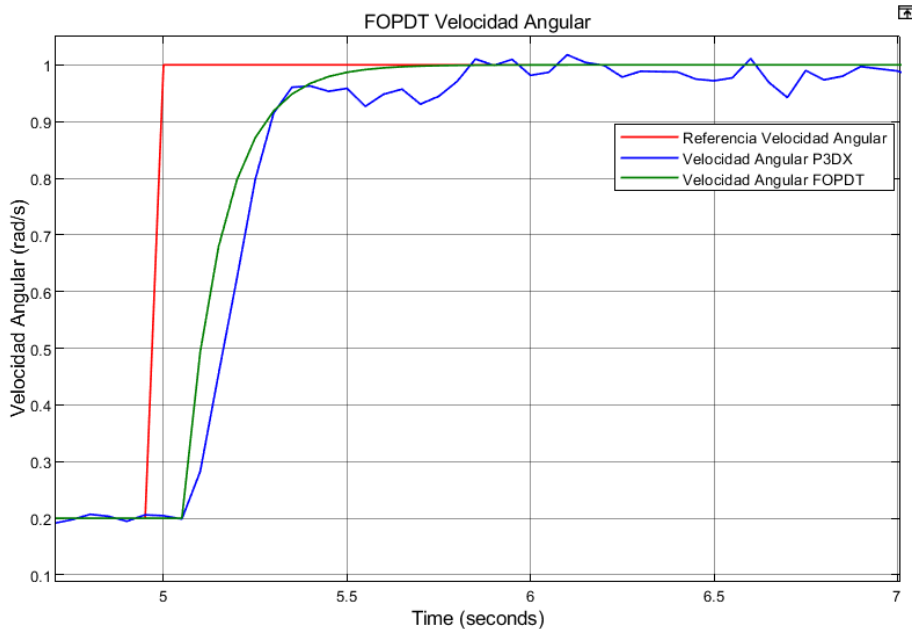


Figura 2.8. Curva de reacción de velocidad angular del robot Pioneer 3-DX

Para el robot Pioneer 3-DX los modelos obtenidos fueron:

$$G_u(s) = \frac{e^{-0.13s}}{1 + 0.282s} \quad G_\omega(s) = \frac{e^{-0.104s}}{1 + 0.12s} \quad (2.13)$$

La obtención de estos modelos de primero orden nos servirá posteriormente para el diseño y sintonización de controladores.

2.4. CONTROLADOR CINEMÁTICO

Existen diversos esquemas de control para el seguimiento de trayectorias utilizados en el robot unicycle. Una de las estructuras más utilizadas es un esquema cascada donde se utiliza un controlador cinemático como controlador externo y un controlador dinámico como controlador interno.

El controlador cinemático se encarga de dar las referencias de velocidad para que el robot siga el punto de referencia. Éstas son generadas a partir de la trayectoria deseada, a este punto también se lo conoce como robot virtual. El esquema de control se puede observar en el Anexo A.

Este controlador se obtiene a partir del modelo cinemático explicado en la sección 2.1.3. Sus entradas son las coordenadas de referencia generadas por la trayectoria y la posición actual del robot obtenida mediante odometría³. La ley de control es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} u_{ref}(t) \\ \omega_{ref}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\frac{1}{a} \sin(\omega t) & \frac{1}{a} \cos(\omega t) \end{bmatrix}^x \begin{bmatrix} \dot{X}_{ref}(t) + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} e_x(t)\right) - x(t) \\ \dot{Y}_{ref}(t) + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} e_y(t)\right) - y(t) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Donde:

a : Distancia desde el centro de las ruedas. Debe ser mayor a cero ($a > 0$).

³ Odometría : En la navegación de vehículos con ruedas se emplea la Odometría para obtener la posición del robot mediante cálculos matemáticos.

$[u_{ref} \ \omega_{ref}]^T$: Salidas del controlador cinemático, velocidades de referencia.

e_x, e_y : Errores de posición en el eje x & y. Se calculan a partir de la diferencia entre la posición de referencia (X_{ref}, Y_{ref}) y la posición real (X, Y) .

k_x, k_y : Constantes de sintonización deben ser mayor a cero ($k_x > 0, k_y > 0$)

l_x, l_y : Constantes de saturación ($l_x, l_y \in \mathbb{R}$)

La función *tanh* se utiliza para evitar saturaciones en caso de que existan grandes errores de posición.

2.5. CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

2.5.1. FUNDAMENTOS

La estructura por modos deslizantes se caracteriza por ser un método de control robusto utilizado en sistemas no lineales que, por lo general, operan bajo condiciones de incertidumbre. Para este controlador se considera una superficie deslizante que se identifica como $S(t)$. Esta superficie indica cómo será el comportamiento global del sistema de control, en términos de desempeño de seguimiento y estabilidad del controlador.

Existen algunas superficies con diferentes efectos en el sistema. Sin embargo, para este caso de seguimiento de trayectoria se utilizará la superficie PID como se indica en la Ecuación (2.15) [34].

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int_0^t e(t) dt \quad (2.15)$$

Dónde n es el orden del sistema, $e(t)$ es el error y λ es un parámetro de sintonización.

Debido a que la planta del robot unicycle se aproximó a un modelo FOPDT. El retardo del modelo se puede aproximar a un polo adicional en la función de transferencia según [2]. Con esto se considera el modelo aproximado como un modelo de segundo orden expresado en la Ecuación (2.16).

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{-t_0 s} \cong \frac{K}{(1 + \tau s)(1 + t_0 s)} \quad (2.16)$$

Conociendo que la función de transferencia es de segundo orden, se puede aplicar la Ecuación (2.15) para obtener la superficie PID para el esquema SMC [34].

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t) dt \quad (2.17)$$

La ley de control para un esquema SMC denominada $U(t)$ cómo se puede observar en [2] consta de una componente continua $U_C(t)$ y una discontinua $U_D(t)$. La parte discontinua se encarga de llevar a la variable controlada del sistema a de un estado inicial a una superficie deseada, también se la denomina: control de alcanzabilidad. Su forma se puede observar en la Ecuación 2.18 y se genera a partir de la función sigmoidea utilizando una variable de suavizamiento para evitar el Chattering⁴. Mientras que, la parte continua se encarga de mantener la variable controlada sujeta a la superficie establecida, convergiendo la trayectoria a cero mientras se desliza por la superficie. Se encuentra en función de la referencia $r(t)$ y la salida $x(t)$ al considerar la derivada de la superficie utilizada igual a cero, como se indica en la Ecuación 2.19.

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (2.18)$$

$$\dot{S}(t) = 0 \quad (2.19)$$

$$U(t) = U_D(t) + U_C(t) \quad (2.20)$$

⁴ Vibración de la salida producida por U_c cuando esta se obtiene de la división de un valor cercano a cero.

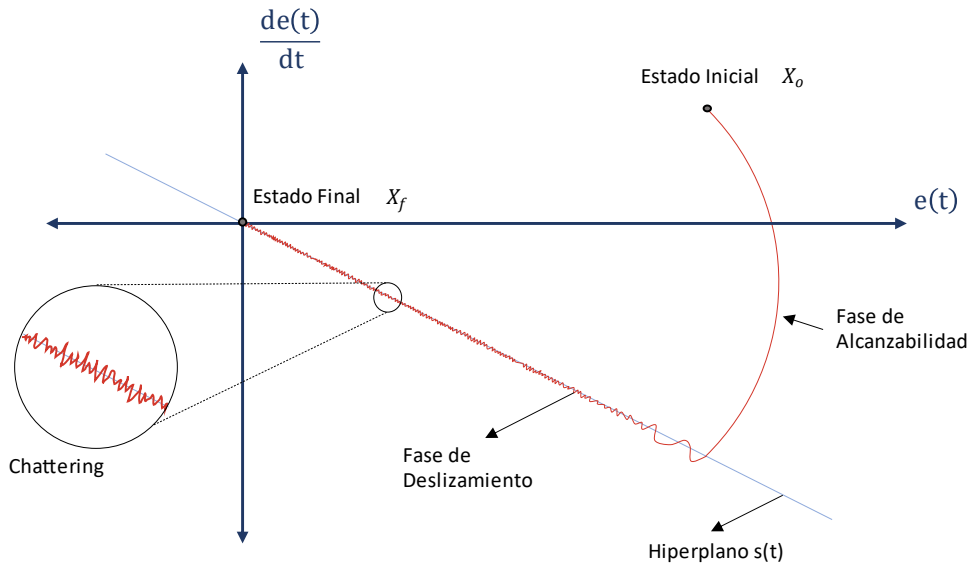


Figura 2.9. Comportamiento del controlador SMC [2]

La ley de control para la parte continua, como se mencionó anteriormente, se obtiene a partir de igualar la derivada de la superficie seleccionada a cero y de la función de transferencia del sistema.

Si se considera la función de transferencia obtenida en la Ecuación 2.16

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{(1 + \tau s)(1 + t_0 s)} \quad (2.21)$$

Al desarrollar la ecuación diferencial

$$t_0 \tau \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + (t_0 + \tau) \frac{dX(t)}{dt} + X(t) = KU(t) \quad (2.22)$$

Utilizando la Ecuación (2.19)

$$\dot{S}(t) = \frac{d^2 e(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de(t)}{dt} + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (2.23)$$

Como $e(t) = R(t) - X(t)$

$$\frac{d^2 R(t)}{dt^2} - \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{dR(t)}{dt} - \lambda_1 \frac{dX(t)}{dt} + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (2.24)$$

Utilizando la Ecuación 2.21 y 2.24 y considerando $R(t)$ constante

$$\left(\frac{\tau + t_0}{\tau t_0} - \lambda_1\right) \frac{dX(t)}{dt} + \left(\frac{1}{\tau t_0} - \lambda_0\right) X(t) + \lambda_0 R(t) = \frac{KU(t)}{\tau t_0} \quad (2.25)$$

Si $\lambda_1 = \frac{\tau + t_0}{\tau t_0}$

$$U_c(t) = \frac{\tau t_0}{K} \left[\frac{X(t)}{\tau t_0} + \lambda_0 e(t) \right] \quad (2.26)$$

La expresión final de la ley del controlador SMC sería

$$U(t) = \frac{\tau t_0}{K} \left[\frac{X(t)}{\tau t_0} + \lambda_0 e(t) \right] + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (2.27)$$

Los parámetros de sintonización y de suavizamiento se obtienen según [2]:

$$\lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4} \quad (2.28)$$

$$K_D = \frac{0.51}{K} \left[\frac{\tau}{t_0} \right]^{0.76} \quad (2.29)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12 (K K_D \lambda_1) \quad (2.30)$$

En la siguiente sección se utiliza la estructura SMC revisa anteriormente con ciertas variantes.

2.5.2. CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES DINÁMICOS (DSMC)

La estructura de control por modos deslizantes se caracteriza por ser robusta ante perturbaciones y por su versatilidad al ser aplicado en sistemas no lineales. Sin embargo, como se pudo ver en la sección anterior, el Chattering ocasionado por la función signo causa vibraciones en la señal de control y, por consecuente, en la salida del sistema. Además, el SMC [3] no tiene resultados muy favorables ante sistemas con retardo elevado

debido a que, las perturbaciones o cambios de referencias ingresan al sistema después de haber transcurrido el tiempo muerto.

El Chattering puede ser mejorado con la atenuación de δ explicada en la Ecuación 2.18. Sin embargo, también se puede mejorar este efecto al combinar el esquema de control por modos deslizantes con otro, por ejemplo: el Control por Modelo Interno (IMC) o con el Predictor de Smith. A estas estructuras combinadas se las denomina Control por modos deslizantes dinámicos (DSMC). Estos esquemas combinados, además de eliminar el chattering debido a la integración de la acción de control que se encuentra en la Ecuación (2.42), también mejoran la respuesta de sistemas con elevado retardo.

Para este trabajo se utilizó la estructura DSMC que combina el Control por Modelo Interno con SMC. La estructura de control se encuentra en la Figura 2.10.

El IMC utiliza el modelo de primero orden obtenido en la Ecuación (2.13), a éste, se lo divide en una parte invertible denominada por $G_m(s)^-$ y una parte no invertible denominada por $G_m(s)^+$.

El FOPDT se puede subdividir en una función de transferencia de primer orden y un retardo en el tiempo. Se implementa un filtro expresado en la Ecuación (2.31) que permite invertir el término con el sistema de primer orden.

$$G_m(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{-t_0 s} \equiv \frac{K}{1 + \tau s} e^{-t_0 s} \left(\frac{1 + \tau_f s}{1 + \tau_f s} \right) \quad (2.31)$$

Se divide en:

$$G_m(s)^- = K \frac{1 + \tau_f s}{1 + \tau s} \quad G_m(s)^+ = \frac{e^{-t_0 s}}{1 + \tau_f s} \quad (2.32)$$

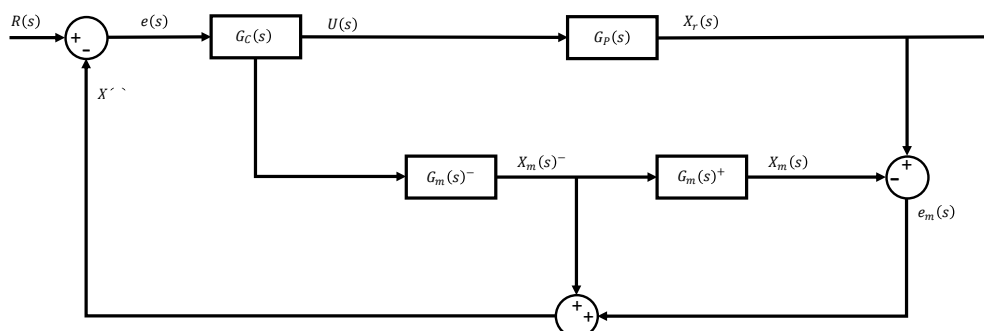


Figura 2.10. Diagrama de Bloques del Control por Modos deslizantes Dinámico (SMC-Dinámico)

Donde:

$R(s)$: Es la referencia del sistema, ya sea la velocidad lineal o angular.

$e(s)$: Es el error del sistema

$e_m(s)$: Es el error de modelado

$G_c(s)$: Controlador DSMC.

$U(s)$: Acción de control

$G_m(s)^-$: Modelo Invertible.

$G_m(s)^+$: Modelo no Invertible.

$G_p(s)$: Planta del sistema Pioneer 3-DX.

$X_m(s)^-$: Salida del modelo invertible

$X_m(s)$: Salida del modelo completo

$X_r(s)$: Salida real del sistema.

Para la acción de control del DSMC se realiza un procedimiento similar a un SMC tradicional:

La función de transferencia del modelo utilizado es:

$$G_m(s)^- = \frac{X_m(s)^-}{U(s)} = K \frac{1 + \tau_f s}{1 + \tau s} \quad (2.33)$$

Se utiliza una superficie PI:

$$S(t) = K_p e^-(t) + \lambda \int e(t) dt \quad (2.34)$$

Donde:

$$e^-(t) = R(t) - X_m^-(t) \quad (2.35)$$

Al derivar la superficie e igualarla a cero:

$$0 = K_p \left(\dot{R}(t) - \dot{X}_m^-(t) \right) + \lambda e(t) \quad (2.36)$$

Desarrollando:

$$X_m^-(t) = \dot{R}(t) + \frac{\lambda}{K_p} e(t) \quad (2.37)$$

Al reemplazar en la Ecuación (2.36)

$$\dot{U}_c(t) = \frac{\tau}{K \tau_f} \dot{R}(t) + \frac{\lambda \tau}{K K_p \tau_f} e(t) + \frac{1}{K \tau_f} X_m^-(t) - \frac{1}{\tau_f} U(t) \quad (2.38)$$

Si se considera una referencia constante y $\lambda = \frac{\tau+t_0}{\tau t_0}$ [2]

$$\dot{U}_c(t) = \frac{\tau \lambda}{K K_p \tau_f} e(t) + \frac{1}{K \tau_f} X_m^-(t) - \frac{1}{\tau_f} U(t) \quad (2.39)$$

$$\dot{U}_D(t) = K_D \operatorname{sgn}(S) \quad (2.40)$$

$$\dot{U}(t) = \dot{U}_c(t) + \dot{U}_D(t) \quad (2.41)$$

$$\dot{U}(t) = \frac{\tau \lambda}{K K_p \tau_f} e(t) + \frac{1}{K \tau_f} X_m^-(t) - \frac{1}{\tau_f} U(t) + K_D \operatorname{sgn}(S) \quad (2.42)$$

Kd se considera [2]:

$$K_D = \frac{0.51}{K} \left[\frac{\tau}{t_0} \right]^{0.76} \quad (2.43)$$

2.5.3. CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES DUAL (DUAL-SMC)

La propuesta de un controlador por modos deslizantes brinda una las ventajas de un sistema de control robusto ante variaciones en el modelo de sistemas no lineales. Sin embargo, existe la opción de utilizar una superficie PID, PD o PI para el diseño del SMC.

Cada una de las superficies mencionadas anteriormente tiene características que representan beneficios al ser implementadas. Por ejemplo: al diseñar un controlador SMC basado de una superficie PD este tendrá una acción de control muy rápida, sin embargo, al alcanzar la referencia la respuesta del sistema siempre tendrá un error en estado estable. Cuando se utiliza una superficie PI el error en estado estable se elimina, sin embargo, por la agresividad de la acción de control existen sobre picos y oscilaciones en la respuesta. La superficie PID proporciona una respuesta sin error en estado estable y con mejor repuesta en la etapa transitoria, sin embargo, no es igual de veloz que el PD.

El SMC DUAL busca combinar el uso de dos controladores independientes: un SMC con superficie PD que actúa cuando se necesita una acción rápida del controlador y un SMC

con superficie PID que actúa cuando el sistema ha alcanzado la referencia y se necesita eliminar el error en estado estable.

El diseño del controlador SMC con superficie PID se explicó en la sección 2.5.1. a continuación se detalla el diseño de un SMC con superficie PD.

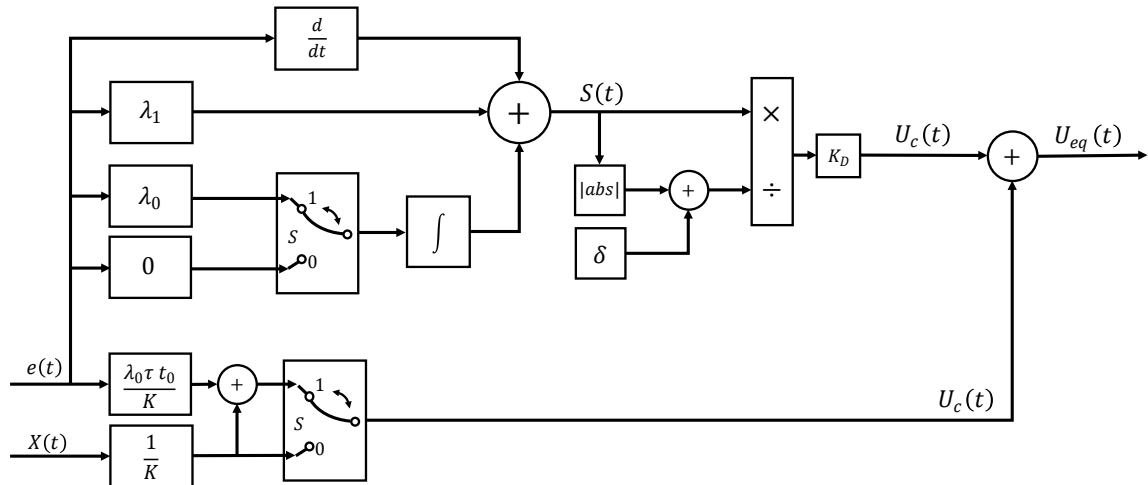


Figura 2.11. Diagrama de Bloques del Control por Modos deslizantes DUAL (DUAL-SMC)

Según [4] el algoritmo de conmutación entre los dos controladores se da ante dos situaciones:

- 1) Cambió el punto de referencia establecido.
- 2) El valor absoluto del error superó el límite establecido ε .

El algoritmo se puede observar de mejor manera en la siguiente figura:

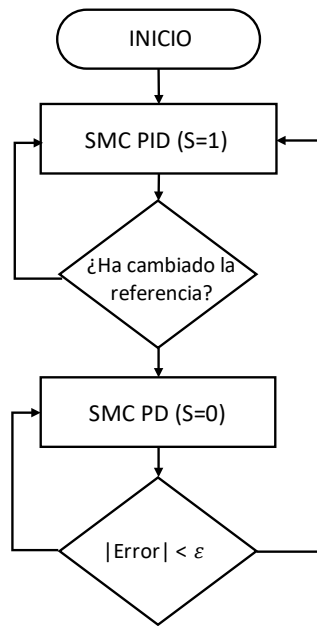


Figura 2.12. Algoritmo de conmutación DUAL-SMC [4]

Esto se aplica para procesos de seguimiento con cambios de referencia tipo escalón, donde el valor de referencia tiene períodos donde se mantiene estable en el tiempo y la acción de control provoca que la salida alcance a la referencia. El proceso de seguimiento de trayectoria no es un proceso donde la referencia se mantiene constante en el tiempo y tiene cambios tipo escalón. Si no, se encuentra constantemente variando en el tiempo. Es por eso, que para realizar la conmutación de los controladores se utiliza el criterio de: $|Error| < \varepsilon$. Según la recomendación de [4] el valor de ε se puede considerar el 5% del error máximo.

Los parámetros de sintonización establecidos en las secciones anteriores definidas por [2] varían ligeramente para la implementación del DUAL-SMC, según lo propuesto en [4].

Se define una relación entre los dos controladores como: H/L (*High Gain/Low Gain*), para los controladores SMC PD y PID respectivamente, donde la ganancia aplicada a los controladores se puede establecer por K_{D0} , donde:

$$K_{D0} = \frac{0.51}{K} \left[\frac{\tau}{t_0} \right]^{0.76} \quad (2.44)$$

De esta manera se define las ganancias como:

$$K_{D1} = H * K_{D0} \quad (2.45)$$

$$K_{D2} = L * K_{D0} \quad (2.46)$$

Sin embargo, para que haya una conmutación suave se debe asegurar que la relación H/L sea cercana a uno. Otra forma de asegurar una conmutación suave es de la siguiente manera:

$$K_{D1} = K_{D2} = K_{D0}(\rho + \gamma|e(t)|) \quad \text{ó} \quad K_{D1} = K_{D2} = K_{D0}(\theta + \phi e(t)^2) \quad (2.47)$$

Los valores de ρ , γ , θ y ϕ pueden ser calculados mediante la relación H/L de la siguiente manera:

$$\rho + \gamma e_{max} = H; \quad \rho + \gamma e_{small} = L; \quad \theta + \phi e_{max}^2 = H; \quad \theta + \phi e_{small}^2 = L \quad (2.48)$$

Desarrollando:

$$\gamma = \frac{H - L}{e_{max} - e_{small}}; \quad \rho = L - \gamma e_{small}; \quad \phi = \frac{H - L}{e_{max}^2 - e_{small}^2}; \quad \theta = L - \phi e_{small}^2 \quad (2.49)$$

Donde e_{max} es un estimado del máximo error del sistema, e_{small} es una constante positiva que define el límite del error cuando el error entra en un “estado estable”. Es decir, el error en estado estable del sistema.

2.6. EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

Los controles propuestos permiten que el robot siga una trayectoria establecida por el “robot virtual”. El objetivo de este trabajo es probar y comparar los esquemas de control diseñados para el seguimiento de trayectoria. Como se ha visto en otros trabajos, la diferencia más evidente entre los controladores se presenta en el inicio del seguimiento, cuando el robot se encuentra en una posición y dirección inicial diferente a la del robot virtual. Esto quiere decir que, durante la etapa transitoria del control se dan las principales diferencias entre los controladores.

Por esto se ha decidido implementar un sistema de evasión de obstáculos. De esta manera en el espacio de pruebas puede colocarse diferentes obstáculos que el robot deberá evadir, mientras realiza el seguimiento de trayectorias. Así, durante la realización de la prueba se tendrán diferentes perturbaciones en el sistema representadas como obstáculos. Permitiendo que los casos de prueba tengan más etapas transitorias en el control, lo cual permitirá una mejor comparación de los controladores diseñados. A continuación, se detalla

el tipo de algoritmo utilizado para la evasión de obstáculos. Es importante resaltar que se optó por un algoritmo de evasión sencillo para escatimar recursos de procesamiento en el robot y debido a que su propósito es la comparación de los controladores de seguimiento de trayectoria.

El robot Pioneer 3-DX posee 8 sensores ultrasónicos ubicados en la parte delantera del robot. Estos fueron utilizados para la detección de obstáculos y maniobrabilidad del robot para la evasión de estos.



Figura 2.13. Disposición de los sensores al frente del robot Pioneer 3-DX [5].

Los vehículos de Braitenberg [35] son robots con una construcción y programación simple, capaces de desarrollar procesos o tareas complejas. Para un ser humano estas tareas requieren una interpretación lógica y cierta capacidad de decisión.

Un claro ejemplo de un vehículo de Braitenberg es un robot con dos ruedas y dos sensores de luz. Cada sensor del robot está conectado a una de sus ruedas. El funcionamiento simple del robot es: mientras el sensor de luz tenga más exposición a la luz el motor al que se encuentra conectado girará más rápido. De esta se tiene dos combinaciones. Una donde el robot se acercará hacia la fuente de luz y otra donde el robot se alejará de la fuente de luz.

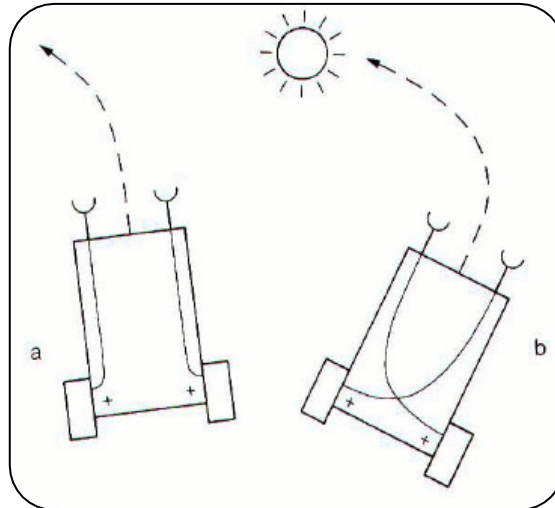


Figura 2.14. Vehículos de Braitenberg [35]

El algoritmo de evasión del Pioneer 3-DX tiene un funcionamiento similar, reemplazando los sensores de luz por los sensores ultrasónicos que miden la distancia desde el robot hacia los objetos. Siendo una distancia menor una señal con más intensidad que recepta el sensor y por lo tanto gira más rápido la rueda del robot.

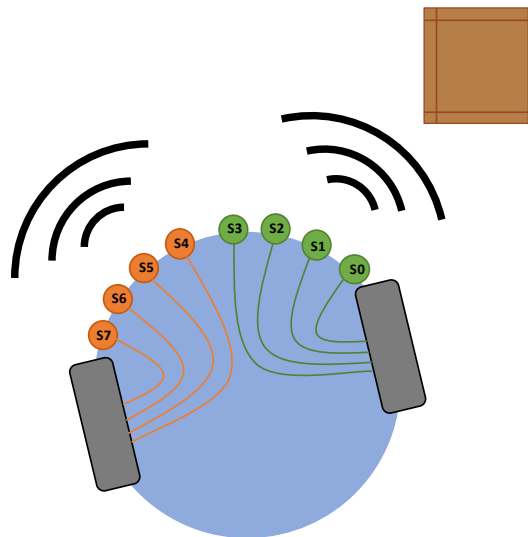


Figura 2.15. Evasión Pioneer 3-DX

El robot se encuentra programado de tal forma que, cuando detecta un objeto, con cualquiera de sus sensores, a menos de d_{min} , la distancia mínima de detección (0.5 m) pasa a “Modo Evasión” caso contrario, no existe ningún objeto cerca, el robot pasa a “Modo Seguimiento”. La selección del Modo en el que se encuentra el robot se da mediante el siguiente proceso:

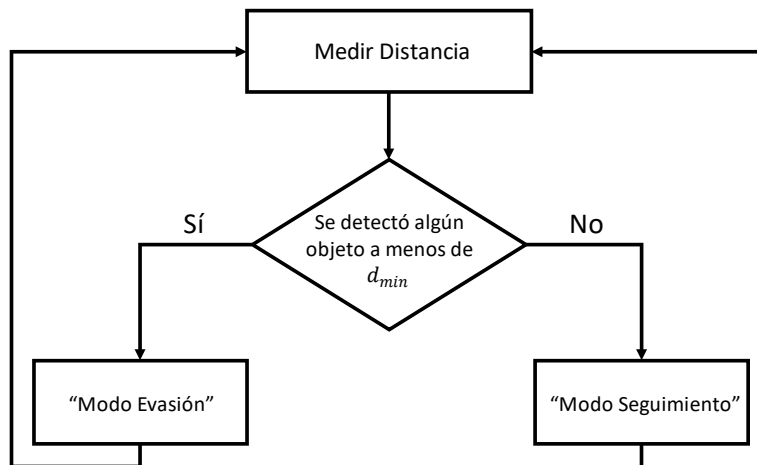


Figura 2.16. Selección del modo de operación del robot

La ecuación utilizada para la velocidad de cada motor, cuando se encuentra en “Modo Evasión” es la siguiente:

$$V_{m_{izq}} = -0.2 (Dist_{S1}) - 0.4(Dist_{S2}) - 0.6(Dist_{S3}) - 0.8(Dist_{S4}) - 1(Dist_{S5}) - 1.2(Dist_{S6}) - 1.4(Dist_{S7}) - 1.6(Dist_{S8}) \quad (2.50)$$

$$V_{m_{der}} = -1.6 (Dist_{S1}) - 1.4(Dist_{S2}) - 1.2(Dist_{S3}) - 1(Dist_{S4}) - 0.8(Dist_{S5}) - 0.6(Dist_{S6}) - 0.4(Dist_{S7}) - 0.2(Dist_{S8}) \quad (2.51)$$

2.7. DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

La incorporación de un espacio determinado para la interacción del usuario con la simulación, además, es necesaria para una visualización más organizada del proceso y monitoreo de la información generada.

Una interfaz gráfica es importante para la visualización individual de los valores producidos en la salida de la simulación. La interpretación de datos se facilita y además permite la configuración de algunos parámetros de sintonización. A continuación, se indica la interfaz de usuario desarrollada en App Designer de Matlab [6].

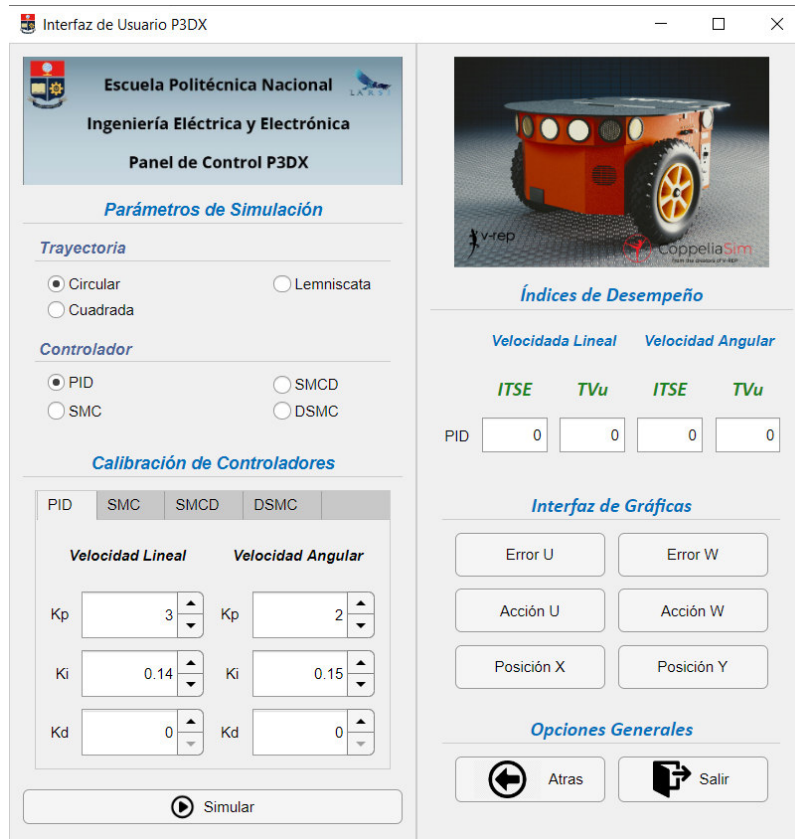


Figura 2.17. Interfaz gráfica desarrollada en App Designer MATLAB.

A la iniciar la aplicación se despliega una ventana de bienvenida. En esta ventana se encuentra el título del proyecto de titulación, los nombres de los autores. Además, se encuentra un botón ("Iniciar") que conduce a la siguiente ventana de la interfaz.



Figura 2.18. Ventada de bienvenida de la Interfaz de Usuario P3-DX.

En la parte superior de la interfaz se colocó la información principal del proyecto, así como el nombre de los integrantes:

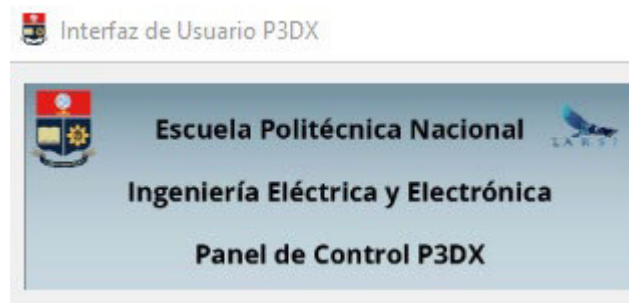


Figura 2.19. Título y presentación de la Interfaz de Usuario P3-DX.

Se asignó un área para la selección de la trayectoria y el controlador deseado. Se puede cambiar la trayectoria mientras la simulación está corriendo para aumentar la dificultad de seguimiento:

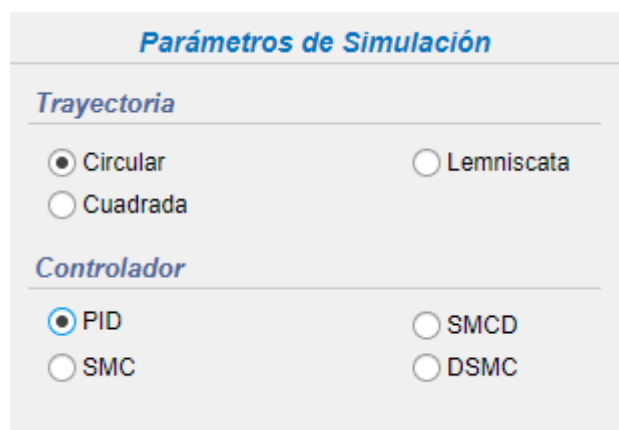


Figura 2.20. Selección de trayectoria y controlador en la Interfaz de Usuario P3-DX.

Además, se asignó un espacio para poder cambiar los parámetros de sintonización de los diferentes controladores. PID, SMC, DSMC y DUAL-SMC. Al seleccionar cada pestaña se cambian automáticamente los parámetros para cada controlador. Estos se encuentran inicialmente sintonizados según las ecuaciones de cada controlador, especificados en las secciones anteriores. También cuenta con un botón ("Simular") para iniciar y detener la simulación

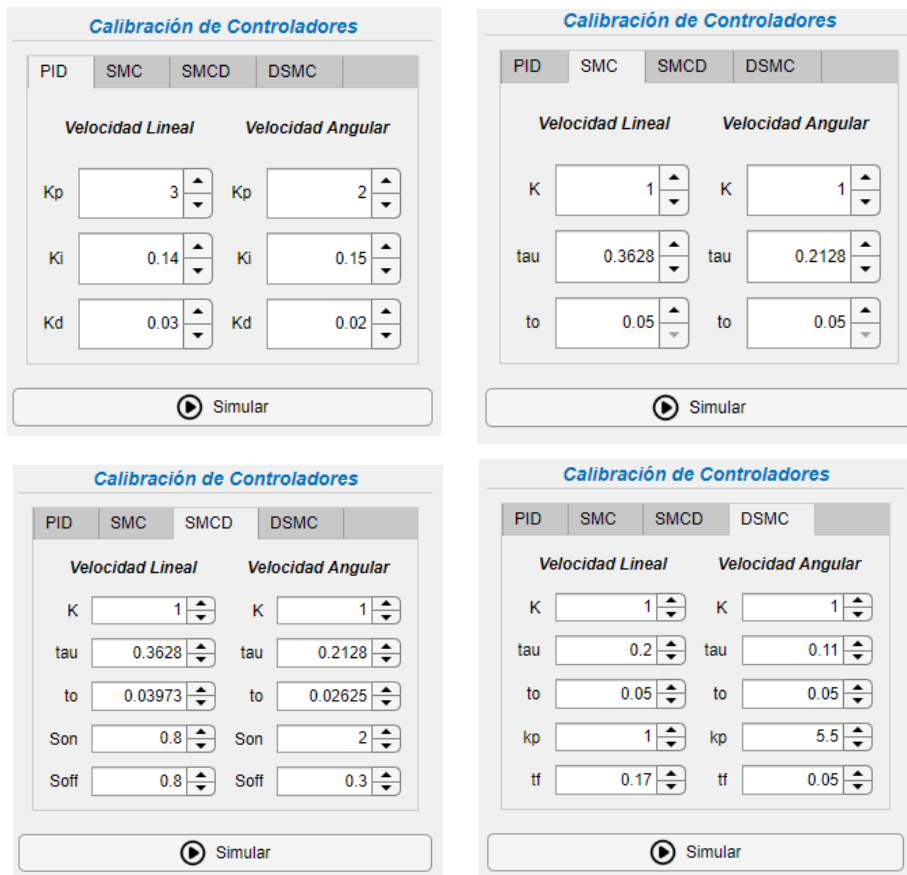


Figura 2.21. Configuración de parámetros de sintonización Interfaz de usuario P3-DX

En la sección de la derecha de la ventana se encuentran los índices de rendimiento ITSE y TVU que se van obteniendo en tiempo real de la simulación. Además, existen botón que despliegan las gráficas en tiempo real de las salidas, errores y acciones de control del sistema. Finalmente se encuentra un botón (“Atrás”) para volver a la ventana de bienvenida y otro (“Salir”) para poder salir del aplicativo.

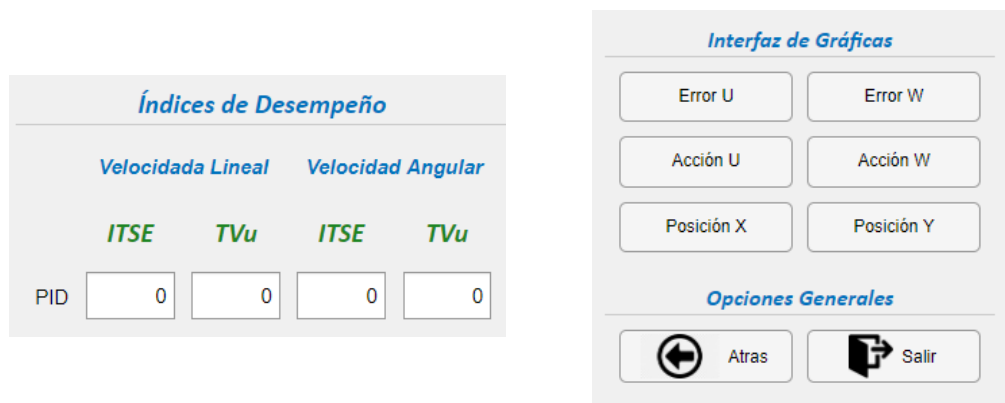


Figura 2.22. Índices de rendimiento y gráficas de la Interfaz de usuario P3-DX

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de los 4 esquemas de control desarrollados e implementados en el robot Pioneer 3-DX, además de evaluar y cuantificar su desempeño a través de los índices ITSE y TVu.

Si bien el controlador SMC dual y dinámico se desarrollan para mejorar la respuesta transitoria en el seguimiento de trayectorias, se realizan igualmente pruebas de evasión de obstáculos con el fin de demostrar la aplicación y robustez de estos.

Para obtener resultados comparables entre todos los controladores, se simulan todas las trayectorias con los siguientes parámetros:

- Seguimiento de la trayectoria lemniscata de radio: 5 metros en un tiempo de 65 segundos.
- Seguimiento de la trayectoria circular de radio: 5 metros en un tiempo de 65 segundos.
- Seguimiento de la trayectoria cuadrada con cada lado de: 10 metros en un tiempo de 81 segundos.

De cada simulación se presentan los gráficos de la respuesta transitoria, donde se puede observar como el robot alcanza la referencia y de esta manera evidenciar la parte de interés del comportamiento de los controladores.

Se consideran los siguientes parámetros dentro de la plataforma CoppeliaSim y Matlab para la simulación e implementación de los controladores:

- El punto de interés se encuentra ubicado a una distancia de 16.5 [cm] al frente del centro del eje de las ruedas, denominado por α .
- La distancia entre las ruedas del robot es de 33.1 [cm]
- El diámetro de cada rueda es de 19.5 [cm]
- Se tienen 8 sensores ultrasónicos capaces de medir un obstáculo a una distancia de 80 [cm] del propio sensor.

3.1. Trayectoria Circular

Esta trayectoria se define por las ecuaciones $x = r \cos(\omega t)$ y $y = r \sin(\omega t)$ donde r se refiere al radio del círculo con un valor de 5 metros y ω se refiere a la velocidad angular de la trayectoria referencial.

Se efectuó la simulación de la trayectoria circular para cada controlador, presentando los siguientes gráficos: comportamiento inicial de los controladores, posición en X, Y y ángulo ϕ de referencia vs real, velocidades de referencia vs reales (lineal y angular) y errores.

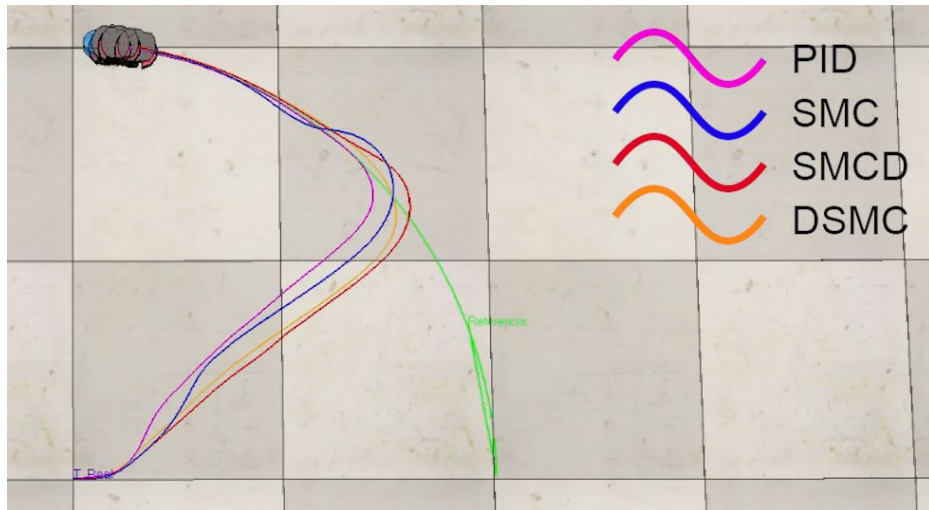


Figura 3.1. Respuesta inicial del seguimiento de trayectoria circular con los 4 controladores desarrollados

En la figura 3.1 se observa que los controladores SMC-Dinámico y PID tienen mejor desempeño que los controladores por modos deslizantes tradicionales y duales en la respuesta transitoria al no tener un sobre impulso al alcanzar la trayectoria.

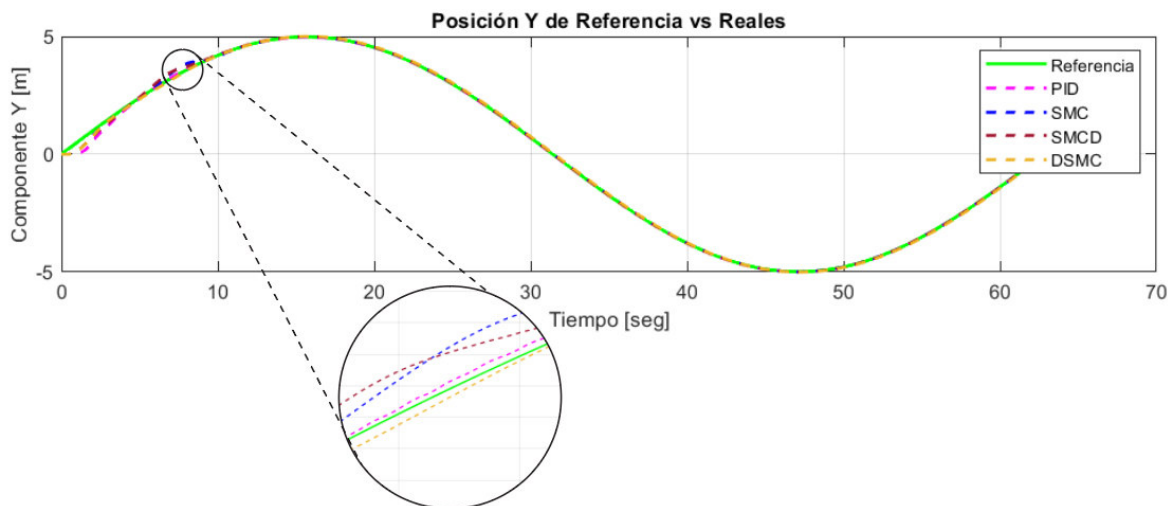


Figura 3.2. Trayectoria de Y del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Circular)

Los controladores por modos deslizantes duales y dinámicos tienen un mejor desempeño al momento que el robot arranca, manteniendo una mejor estabilidad de la rueda “caster”

y disminuyendo el desplazamiento existente hacia la izquierda y notable con los controladores SMC y PID.

En la figura 3.2 se puede observar cómo el mejor desempeño en estado transitorio lo tiene en controlador SMC-Dinámico, siendo el controlador que más rápido alcanza la referencia.

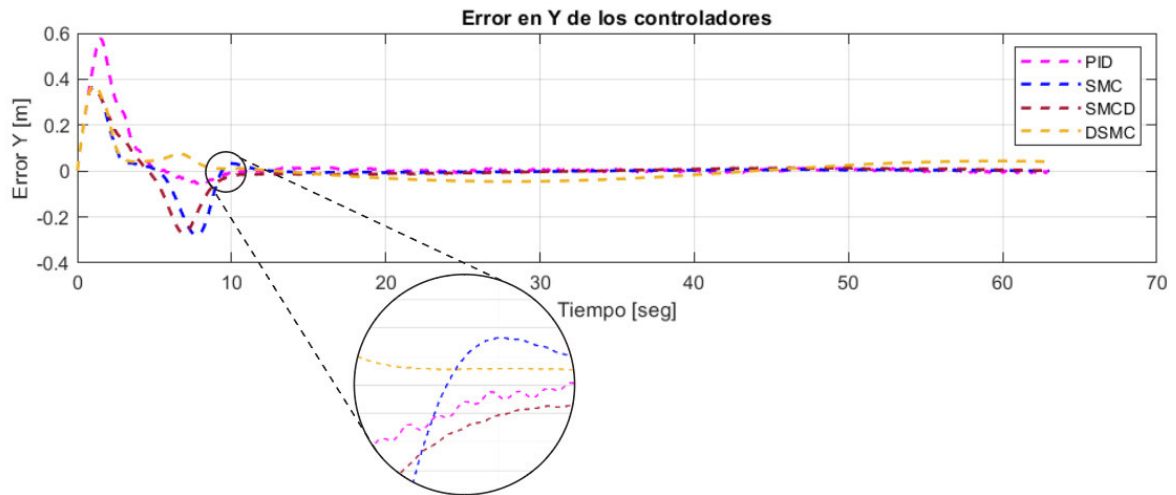


Figura 3.3. Error de trayectoria de Y del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Circular)

En la figura 3.3 se puede apreciar de mejor manera el comportamiento de los controladores. Se puede observar como el controlador SMC y SMC-Dual tienen un error muy cercano a cero, mientras el controlador PID oscila entre $-0.01 [m]$ y $0.01 [m]$ y el controlador SMC-Dinámico oscila entre $-0.04 [m]$ y $0.04 [m]$. En estado transitorio se observa como el controlador SMC-Dinámico tiene picos de error mucho menores al resto de controladores.

En la figura 3.4 se observa como la referencia en X empieza en 5, mientras que el Pioneer 3-DX empieza en 0, por lo que aumenta la acción de control y el error. De igual manera se puede observar cómo en estado estable nuevamente el controlador SMC tradicional es el más cercano a la referencia, mientras que el SMC-Dinámico es el que más alejado se encuentra. Estos errores son mínimos, por lo que a simple vista no se los puede observar, pero a escalas menores se puede observar de mejor manera como se comporta cada controlador.

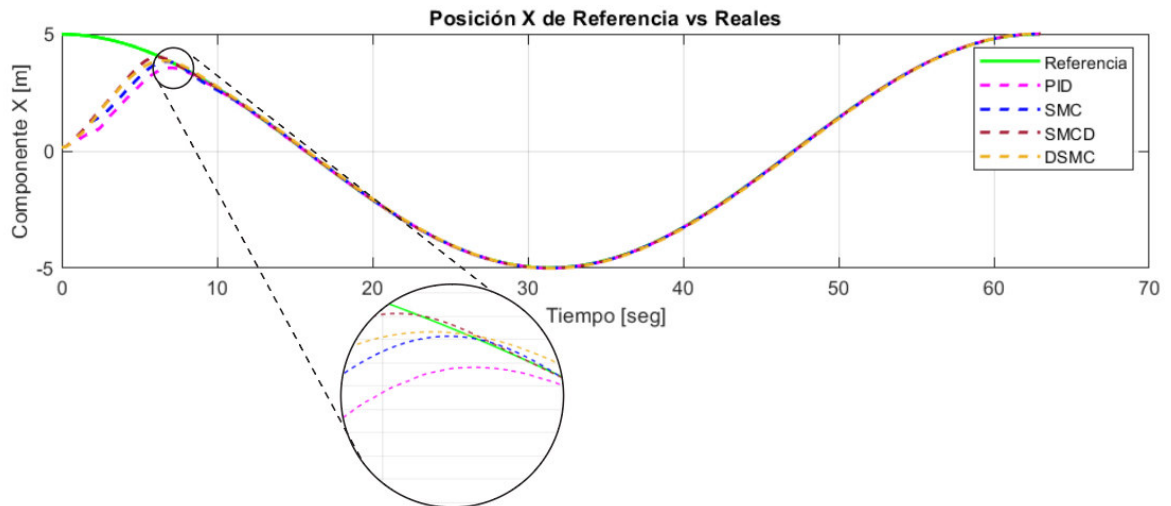


Figura 3.4. Trayectoria de X del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Circular)

En la figura 3.5 se puede observar de mejor manera el comportamiento de los controladores. Los controladores por modos deslizantes en estado transitorio disminuyen el error cercano a cero de manera más rápida que el controlador PID, pero en estado estable el controlador SMC-Dinámico tiene un error oscilatorio entre $-0.04 [m]$ y $0.04 [m]$. El resto de los controladores tiene un error muy cercano a cero no mayor a $0.01 [m]$

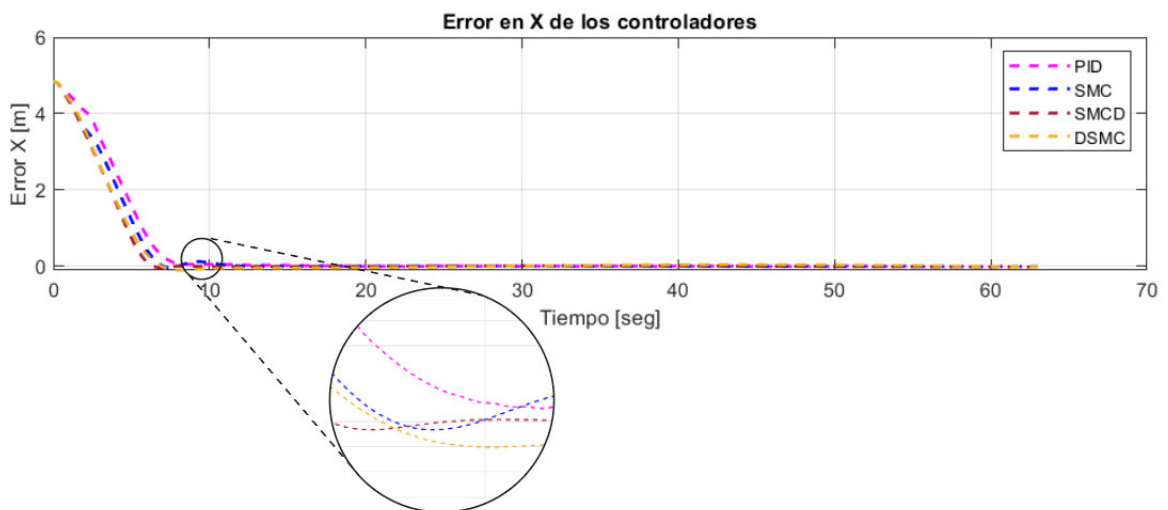


Figura 3.5. Error de trayectoria de X del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Circular)

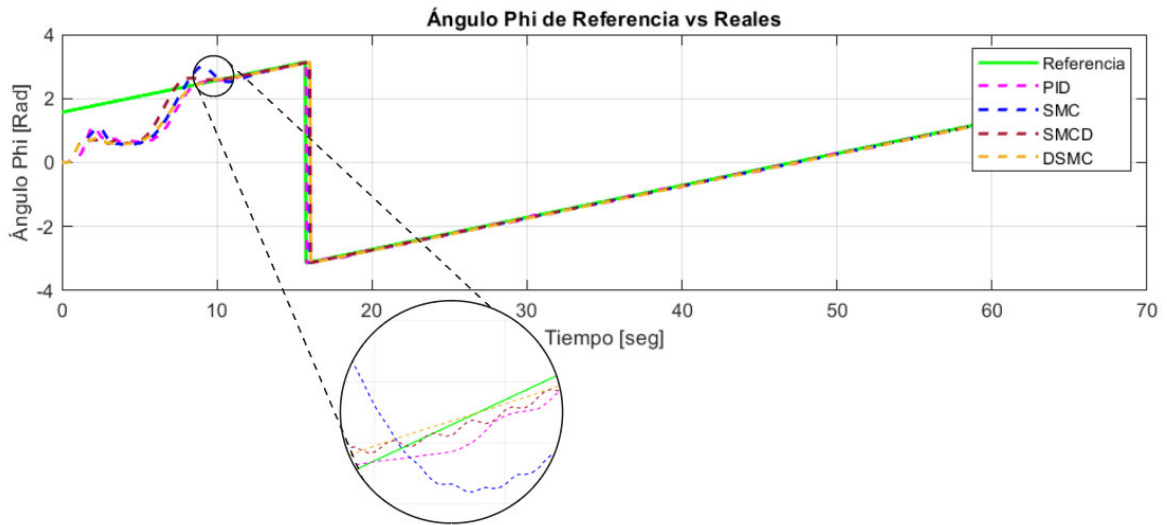


Figura 3.6. Trayectoria de ϕ del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Circular)

En la figura 3.6 se observa como el estado transitorio dura alrededor de 10 segundos cuando se alcanza la referencia en la posición X , Y y ϕ . Se observa claramente como el controlador PID y SMC-Dinámico tienen un sobre impulso mucho menor. De igual manera en estado estable todos los controladores tienen un error similar de 0.02 [rad]

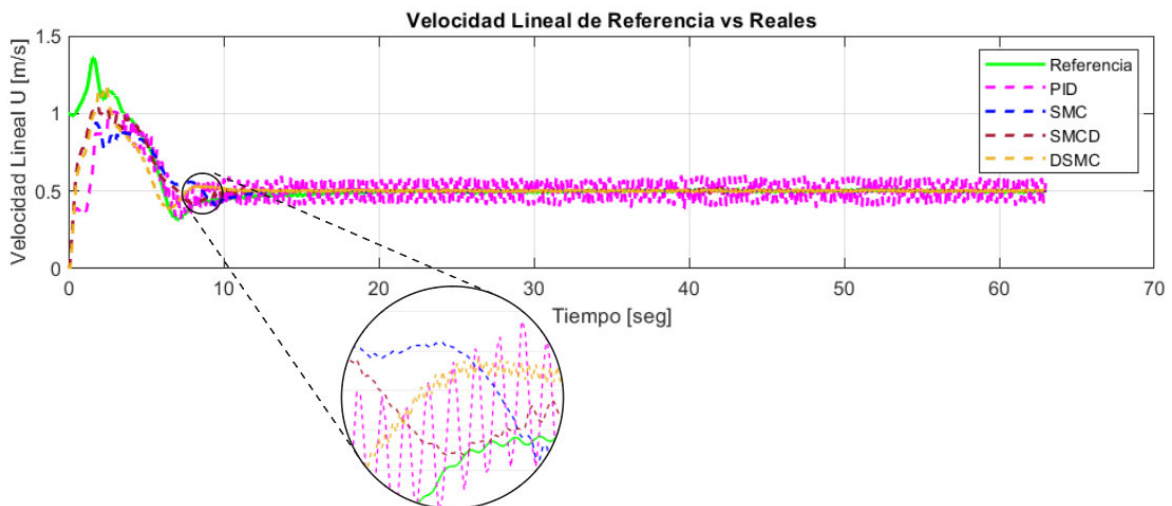


Figura 3.7. Velocidad Lineal u del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Circular)

En la figura 3.7 se puede observar cómo los controladores por modos deslizantes desarrollados tienen un considerable mejor desempeño que el controlador PID. En estado transitorio y estable se observa como el controlador PID cuenta con oscilaciones mucho

mayores al resto de controladores, entre $0.4 \left[\frac{m}{s} \right]$ y $0.6 \left[\frac{m}{s} \right]$ mientras el resto de los controladores oscila entre $0.49 \left[\frac{m}{s} \right]$ y $0.51 \left[\frac{m}{s} \right]$.

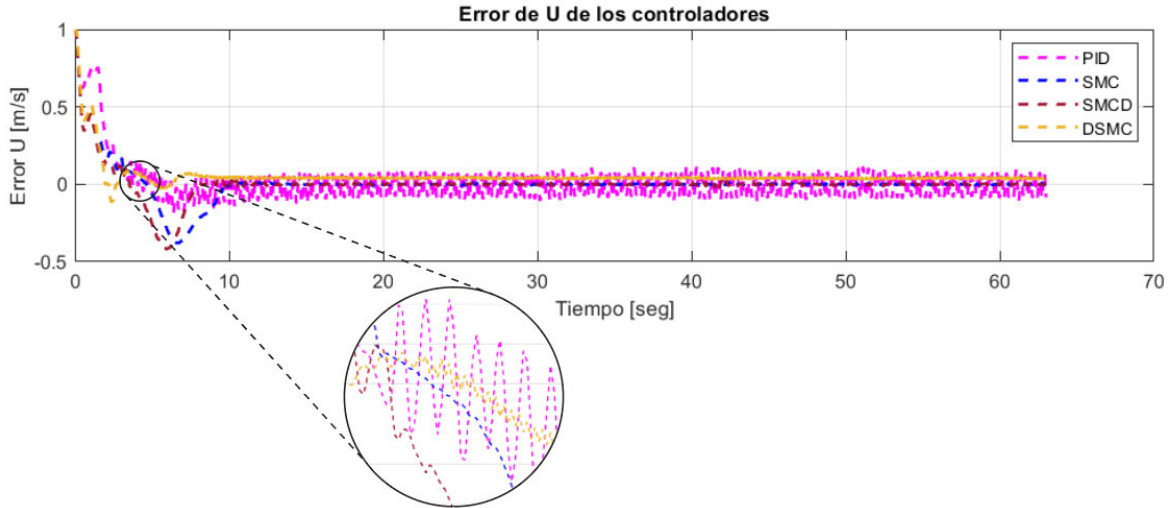


Figura 3.8. Error de la velocidad lineal u del Pioneer 3-DX con los 4 controladores (Trayectoria Circular)

En la figura 3.8 se muestra como el error en estado transitorio sigue siendo mayor para los controladores SMC tradicional y SMC-Dual, sin embargo, la oscilación que presenta el controlador PID es muy significativa en comparación al resto de los controladores. Mientras el error de los controladores por modos deslizantes oscila entre $-0.01 \left[\frac{m}{s} \right]$ y $0.01 \left[\frac{m}{s} \right]$ el error del controlador PID oscila entre $-0.1 \left[\frac{m}{s} \right]$ y $0.1 \left[\frac{m}{s} \right]$, observando de esta manera que el error del controlador PID es 10 veces mayor al error de los controladores por modos deslizantes.

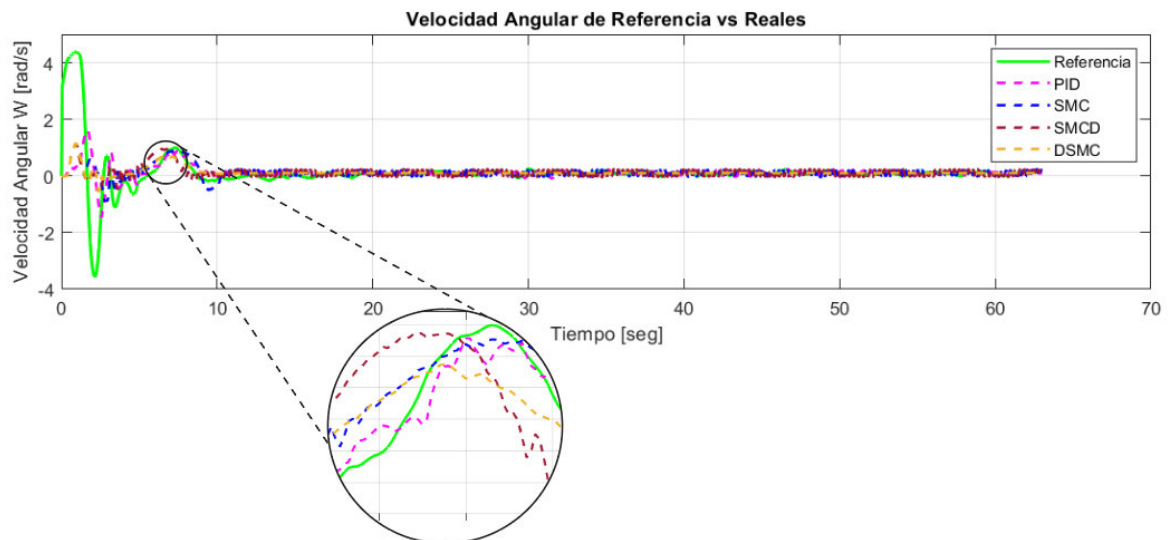


Figura 3.9. Error de la velocidad Angular ω del Pioneer 3-DX con los 4 controladores (Trayectoria Circular)

En la figura 3.9 se observa como todos los controladores tienen un comportamiento muy similar al tratarse de velocidad angular, tanto en estado transitorio como en estado estable. El controlador SMC-Dinámico tiene la menor oscilación en estado estable, variando únicamente $0.005 \left[\frac{rad}{s} \right]$, mientras el resto de los controladores varía $0.2 \left[\frac{m}{s} \right]$.

En la figura 3.10 se observa de mejor manera como el error del controlador SMC-Dinámico es menor y con menor amplitud de oscilación que el resto de los controladores, este tiene un error casi constante de $0.08 \left[\frac{m}{s} \right]$, mientras el error del resto de los controladores oscila entre $-0.1 \left[\frac{rad}{s} \right]$ y $0.15 \left[\frac{rad}{s} \right]$.

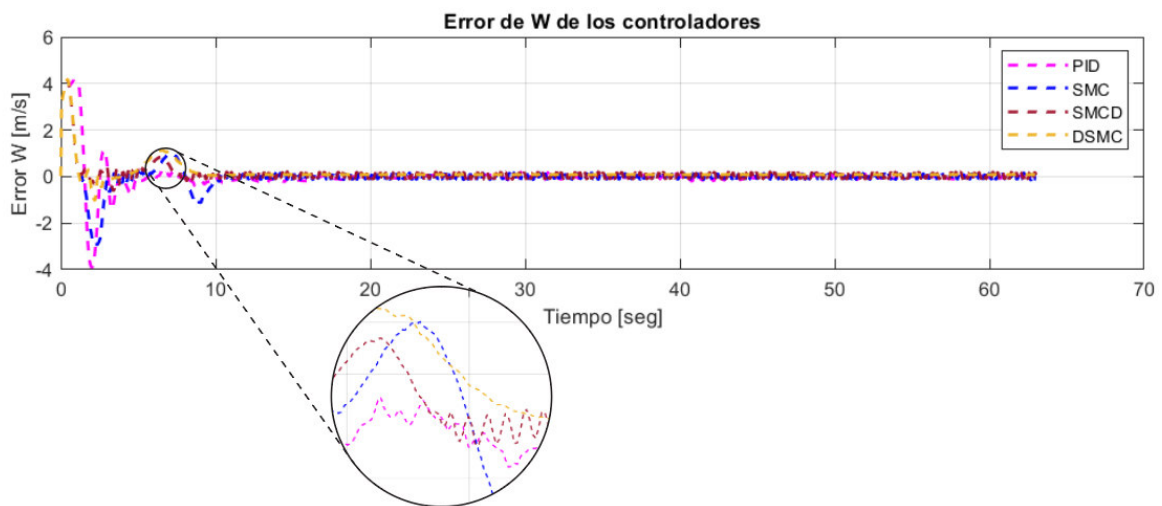


Figura 3.10. Error de la velocidad angular ω del Pioneer 3-DX con los 4 controladores (Trayectoria Circular)

En la figura 3.11 se observa la trayectoria circular completa realizada por todos los controladores. Prácticamente el recorrido en estado estable realizado por todos los controladores es muy similar y a simple vista no se puede diferenciar los errores.

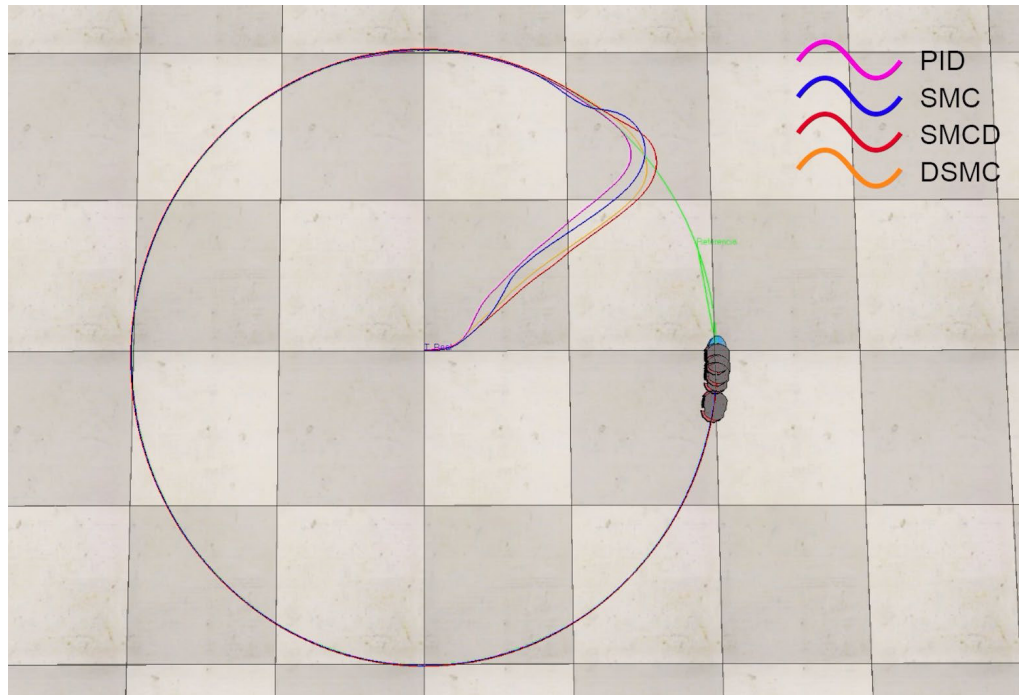


Figura 3.11. Trayectoria circular completa recorrida por el Pioneer 3-DX con los 4 controladores

Tabla 3.1 Comparación de ITSE y TVu para los 4 controladores (Trayectoria Circular)

Circular

ITSE				
	PID	SMC	SMC-DUAL	DSMC
Velocidad Lineal	1,232	0,8029	0,7614	0,6676
Velocidad Angular	16,4	13,73	8,517	9,852
Posición y	0,4563	0,3165	0,34	0,2729
Posición X	67,45	59,39	53,55	55,65

TVu				
	PID	SMC	SMC-DUAL	DSMC
Velocidad Lineal	37,06	34,82	35,26	35
Velocidad Angular	21,6	14,67	15,84	9,087

3.2. Trayectoria Lemniscata

Esta trayectoria se define por las ecuaciones $x = r \cos(\omega t)$ y $y = r \sin(\omega t) \cos(\omega t)$ donde r se refiere al radio del círculo con un valor de 5 metros y ω se refiere a la velocidad angular de la trayectoria referencial.

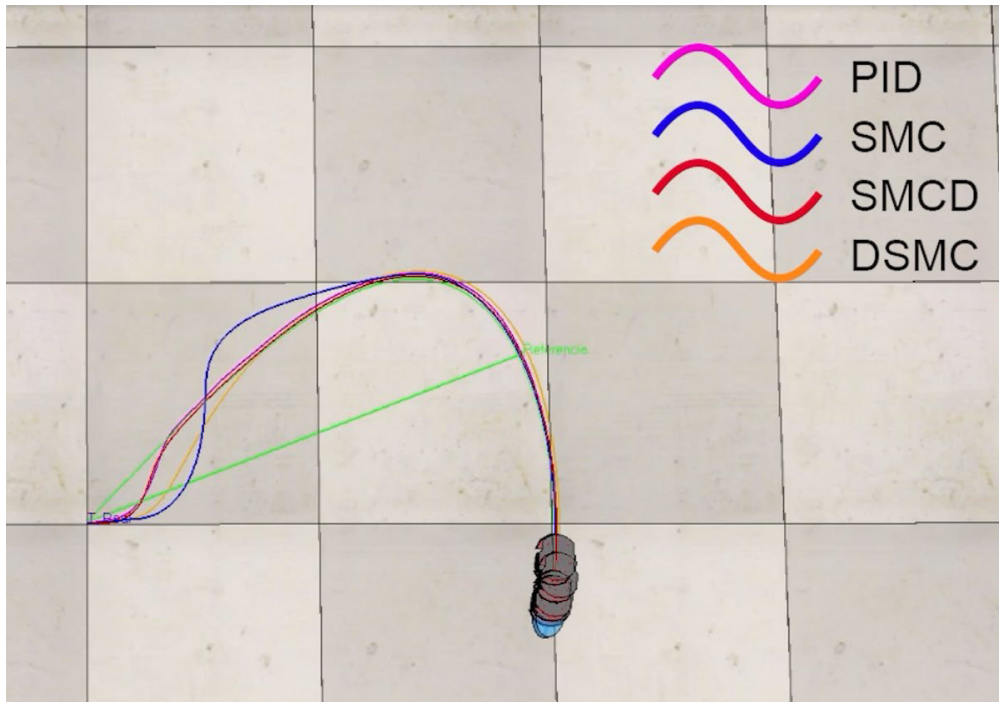


Figura 3.12. Respuesta inicial del seguimiento de trayectoria lemniscata con los 4 controladores desarrollados

Se efectuó la simulación de la trayectoria lemniscata para cada controlador, presentando los siguientes gráficos: comportamiento inicial de los controladores, posición en X, Y y ángulo ϕ de referencia vs real, velocidades de referencia vs reales (lineal y angular) y errores.

En la figura 3.12 se observa que los controladores SMC-Dual y PID tienen la respuesta con menor sobre impulso y que alcanzan más rápido la referencia de la trayectoria, mientras que el controlador SMC tradicional tiene un sobre impulso muy alto.

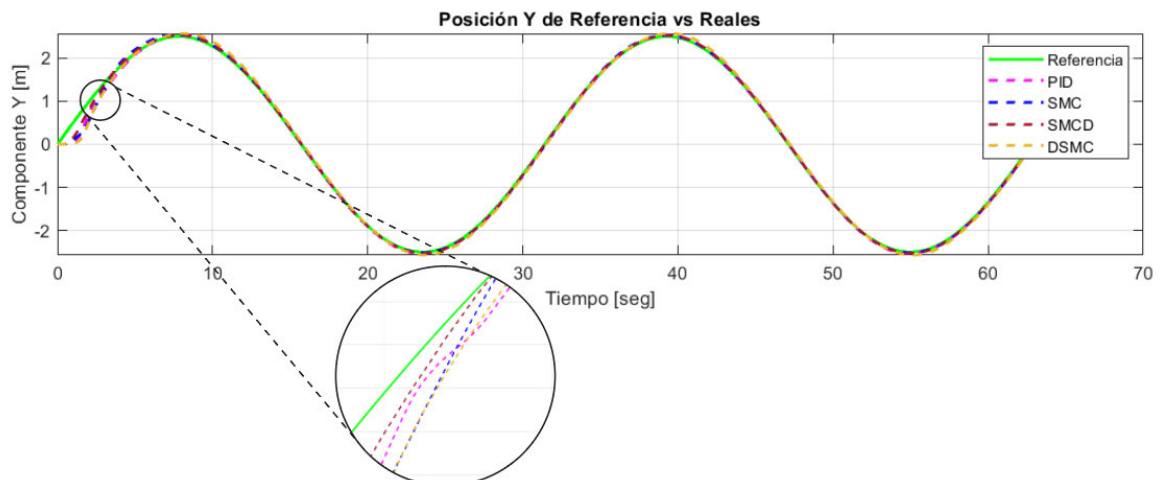


Figura 3.13. Trayectoria de Y del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Lemniscata)

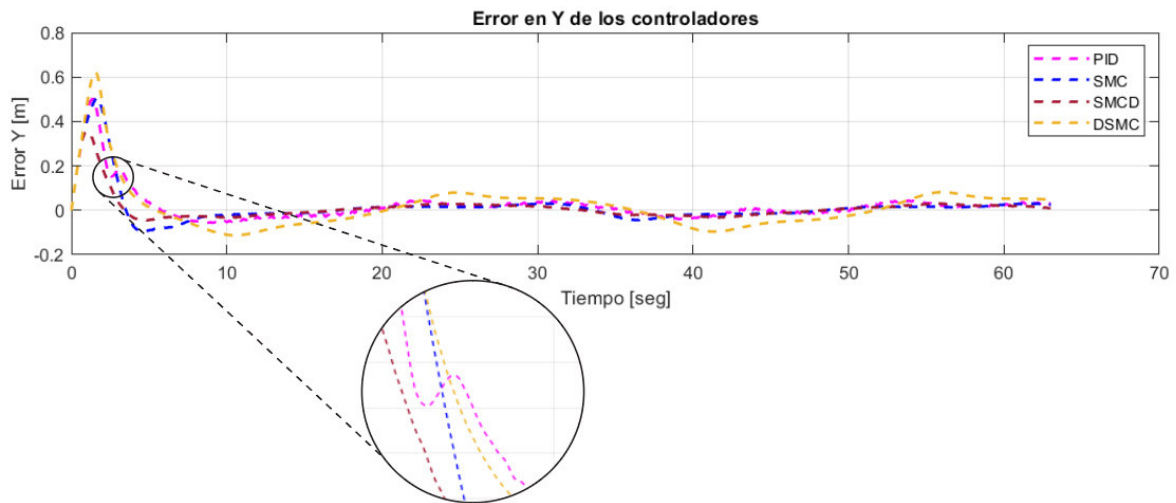


Figura 3.14. Error de trayectoria de Y del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Lemniscata)

En la figura 3.13 se visualiza que todos los controladores alcanzan la referencia de Y en un tiempo similar. En la figura 3.14 se puede observar que existe error en la posición Y, esto es debido a que el ángulo ϕ del robot Pioneer 3-DX al inicio de la trayectoria es de $0 [rad]$, mientras que la trayectoria inicia en un ángulo ϕ de $0.8 [rad]$

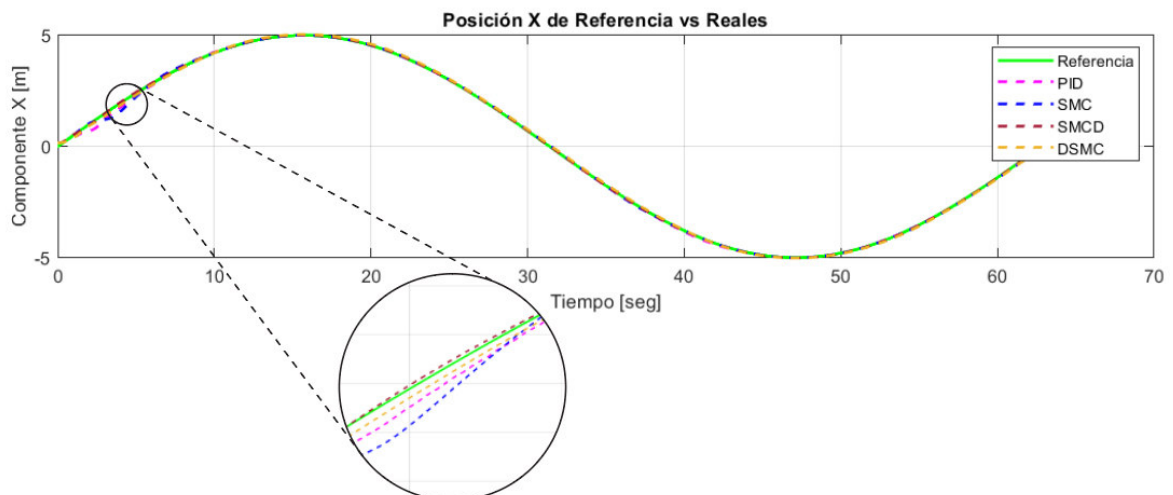


Figura 3.15. Trayectoria de X del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Lemniscata)

En la figura 3.15 se observa un mejor desempeño de los controladores por modos deslizantes dual y dinámico. Todos los controladores alcanzan suavemente la referencia en la posición X. En la figura 3.16 se puede observar nuevamente que se tiene error en el

estado transitorio, debido nuevamente a la diferencia de ángulo ϕ inicial del robot y la trayectoria.

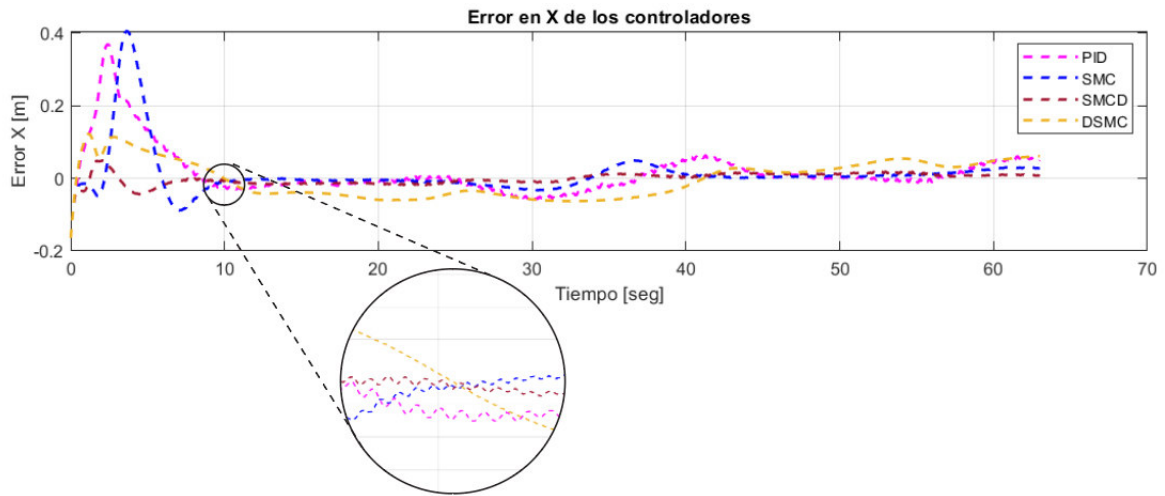


Figura 3.16. Error de trayectoria de X del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Lemniscata)

En la figura 3.17 se observa la diferencia del ángulo ϕ con la que empieza la trayectoria y con la que empieza el robot Pioneer 3-DX, siendo el controlador SMC-Dinámico el que mejor respuesta tiene con menor sobre impulso, sin embargo, el controlador SMC-Dual es el que más rápido alcanza la referencia, mientras que el controlador SMC tiene un sobre impulso 33% mayor que el resto de controladores, llegando a un ángulo de $1.8 [rad]$, mientras que el resto de controladores llegan a un tope de $1.2 [rad]$

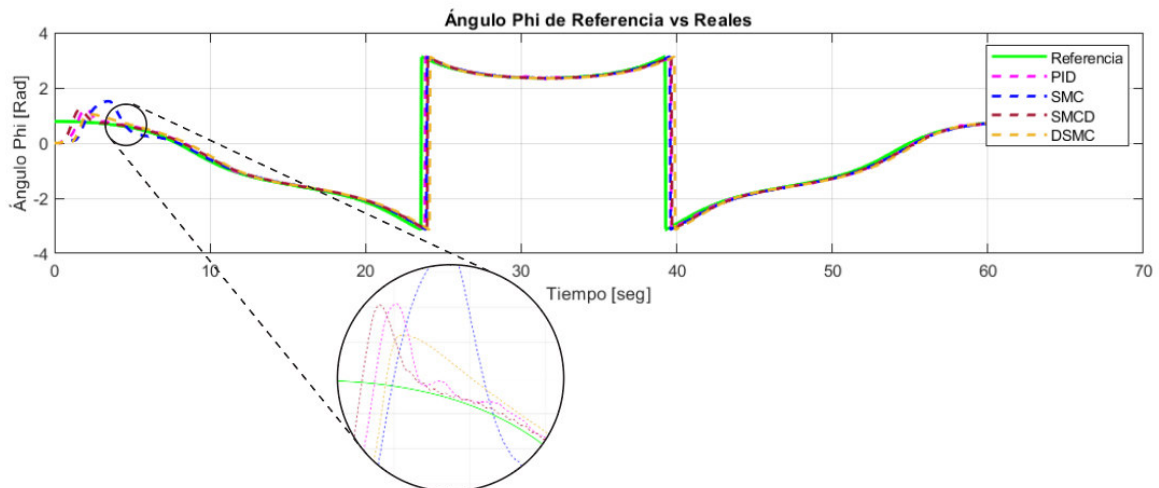


Figura 3.17. Trayectoria de ϕ del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Lemniscata)

En la figura 3.18 se observa que los controladores por modos deslizantes tienen menor oscilación que el controlador PID en estado estable.

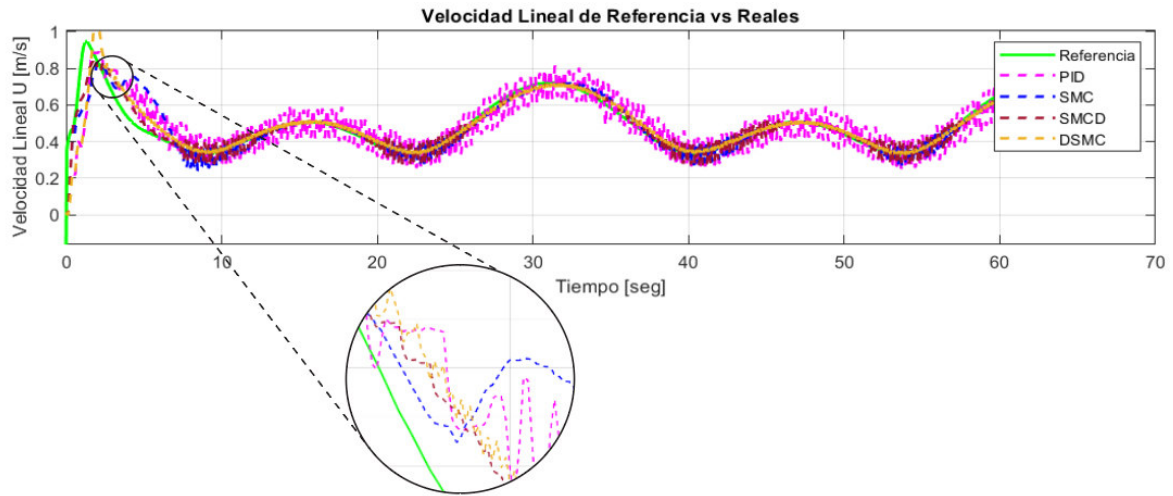


Figura 3.18. Velocidad Lineal u del Pioneer 3DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Lemniscata)

De igual manera el controlador SMC-Dinámico tiene el mayor sobre impulso, mientras que el controlador SMC-Dual tiene la mejor respuesta. En la figura 3.19 se puede observar de mejor manera como los controladores por modos deslizantes tienen una oscilación con amplitud de $0.02 \left[\frac{m}{s} \right]$ el error del controlador PID oscila entre $0.2 \left[\frac{m}{s} \right]$ concluyendo que la amplitud del error por el controlador PID tiene una oscilación 90% mayor al del resto de los controladores.

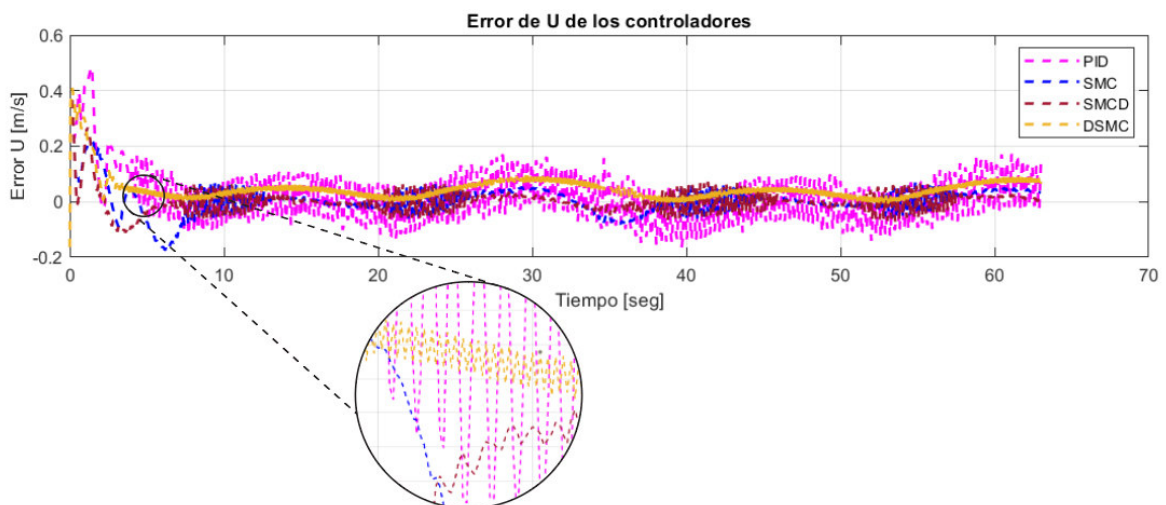


Figura 3.19. Error de la velocidad lineal u del Pioneer 3-DX con los 4 controladores (Trayectoria Lemniscata)

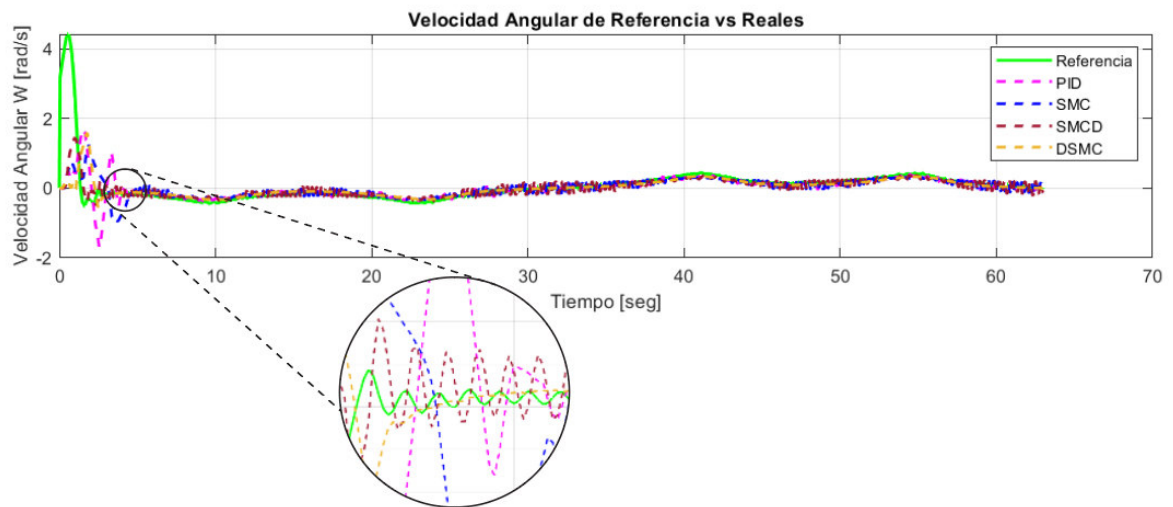


Figura 3.20. Velocidad Angular ω del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Lemniscata)

En la figura 3.20 se observa que el controlador por modos deslizantes dinámico es el que más rápido se estabiliza, al igual que tiene menores oscilaciones al momento de estabilizarse. Igualmente, el controlador PID es el controlador que más oscilaciones tiene, pero ya no son tan notables como en la gráfica de velocidad lineal.

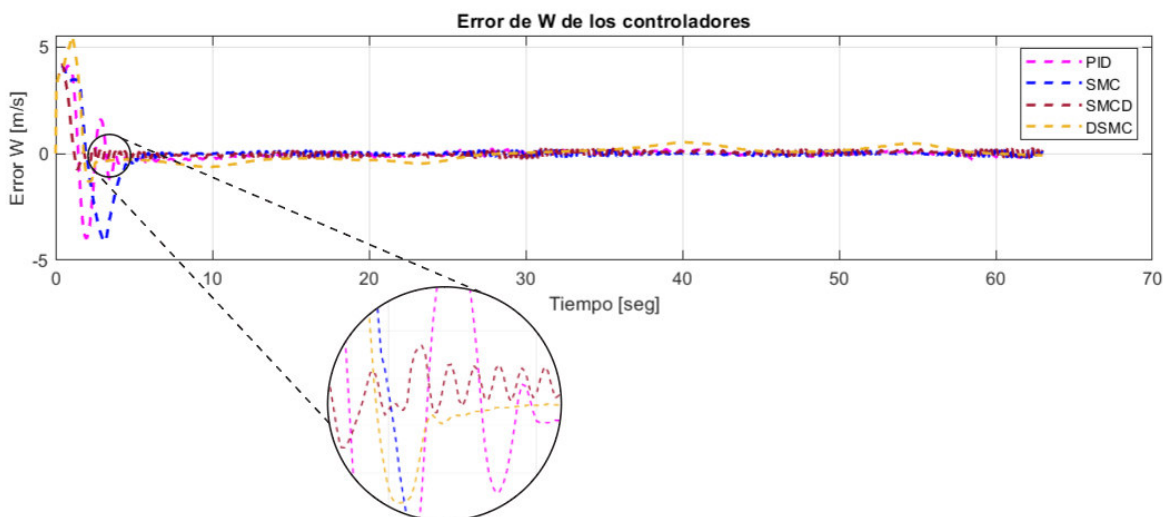


Figura 3.21. Error de la velocidad angular ω del Pioneer 3-DX con los 4 controladores (Trayectoria Lemniscata)

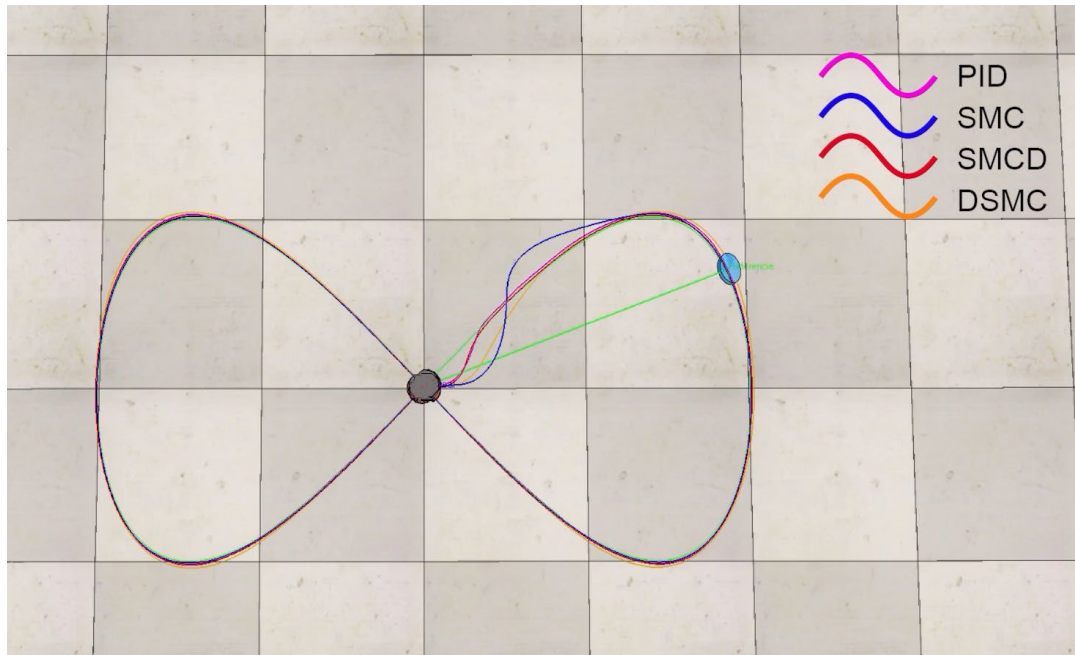


Figura 3.22. Trayectoria lemniscata completa recorrida por el Pioneer 3-DX con los 4 controladores

En la figura 3.21 se observa el error de los controladores, el controlador SMC-Dinámico, aunque sea el que mayor sobre impulso tiene, también es el que más rápido llega a un error muy cercano a cero. De igual manera se puede ver un segundo sobre impulso con los controladores SMC y PID.

En la figura 3.22 se puede observar la trayectoria completa realizada por el robot Pioneer 3-DX. Una vez alcanzado el estado estable se puede observar cómo los controladores tienen un comportamiento similar y tienen un error mínimo no diferenciable.

Tabla 3.2 Comparación de ITSEy TVu para los 4 controladores (Trayectoria lemniscata)

Lemniscata

ITSE				
	PID	SMC	SMC-DUAL	DSMC
Velocidad Lineal	0,553	0,2219	0,1441	0,2652
Velocidad Angular	15,44	44,95	9,918	27,33
Posición y	0,3903	0,8026	0,2149	0,8953
Posición X	0,2002	0,5573	0,03862	0,1811

TVu				
	PID	SMC	SMC-DUAL	DSMC

Velocidad Lineal	37,83	31,47	31,22	31,7
Velocidad Angular	22,73	15,74	15,03	13,36

3.3. Trayectoria Cuadrada

Esta trayectoria está descrita por un cuadrado de longitud por cada lado de 10[m]. Definido por las siguientes ecuaciones:

$$x = vt \quad \text{cuando} \quad y = 0$$

$$x = 0 \quad \text{cuando} \quad y = vt$$

Se efectuó la simulación de la trayectoria circular para cada controlador, presentando los siguientes gráficos: comportamiento inicial de los controladores, posición en X, Y y ángulo ϕ de referencia vs real, velocidades de referencia vs reales (lineal y angular) y errores.

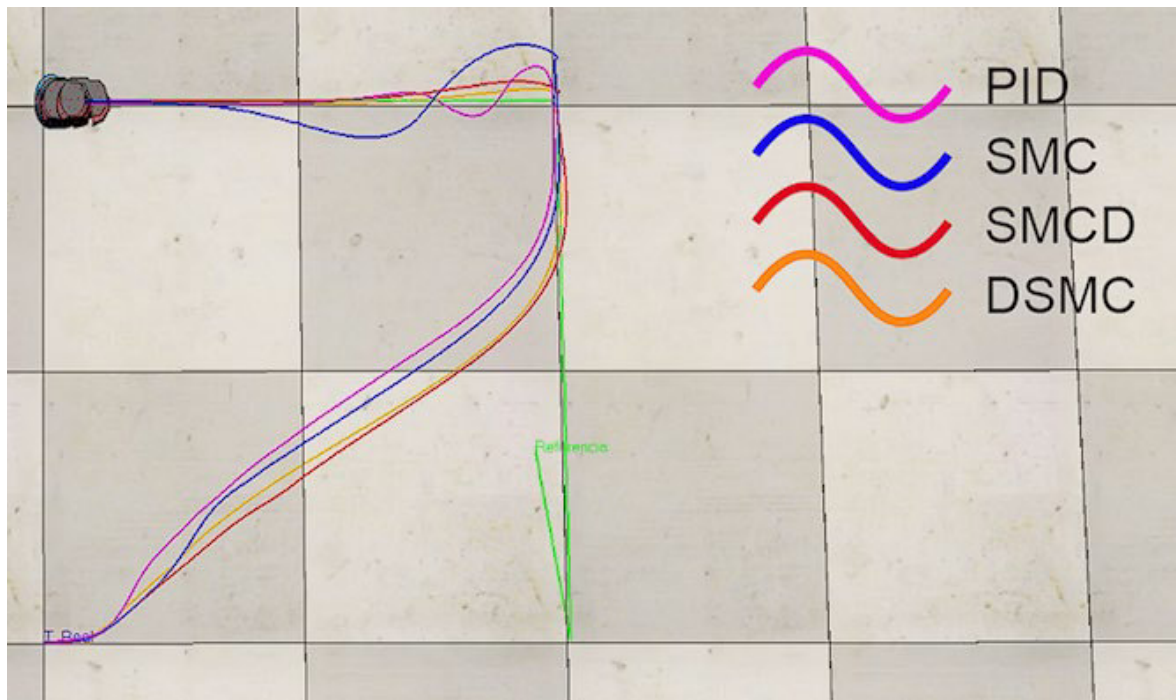


Figura 3.23. Respuesta inicial del seguimiento de trayectoria cuadrada con los 4 controladores desarrollados

En la figura 3.23 se observa que los controladores SMC-Dual y SMC-Dinámico tienen una mejor respuesta hasta el punto donde se alcanza la referencia, al igual que en la curva de 90° en cada esquina del cuadrado. Se puede notar que el controlador PID realiza varias oscilaciones sobre el punto de referencia antes de alcanzar la trayectoria, mientras que el controlador SMC tradicional realiza una oscilación con sobreimpulso mucho más amplia que el resto de los controladores.

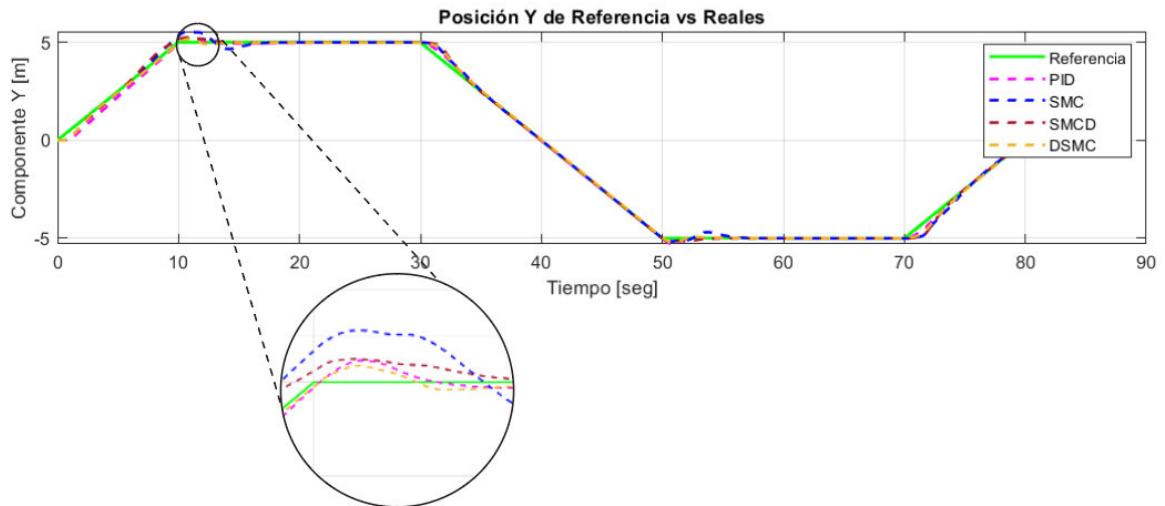


Figura 3.24. Trayectoria de Y del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Cuadrada)

En la figura 3.24 se observa que los controladores SMC-Dinámico, SMC-Dual y el controlador PID tienen una respuesta con mucho menos sobreimpulso que el controlador SMC tradicional. El controlador SMC-Dual y Dinámico tienen menor tiempo de estabilización.

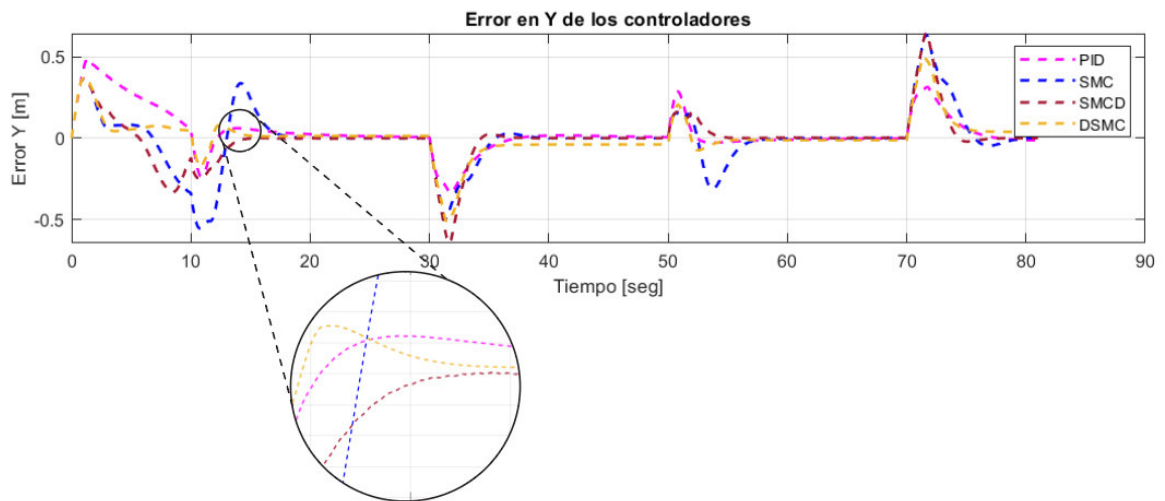


Figura 3.25. Error de trayectoria de Y del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Cuadrada)

En la figura 3.25 se observa que el error del controlador SMC tradicional es de $0.3 [m]$, mientras que el del resto de controladores es de $0.1 [m]$. Para cada esquina del cuadrado se puede observar que los controladores tienen mayor error, manteniéndose el controlador SMC como el controlador con mayor error y sobreimpulso.

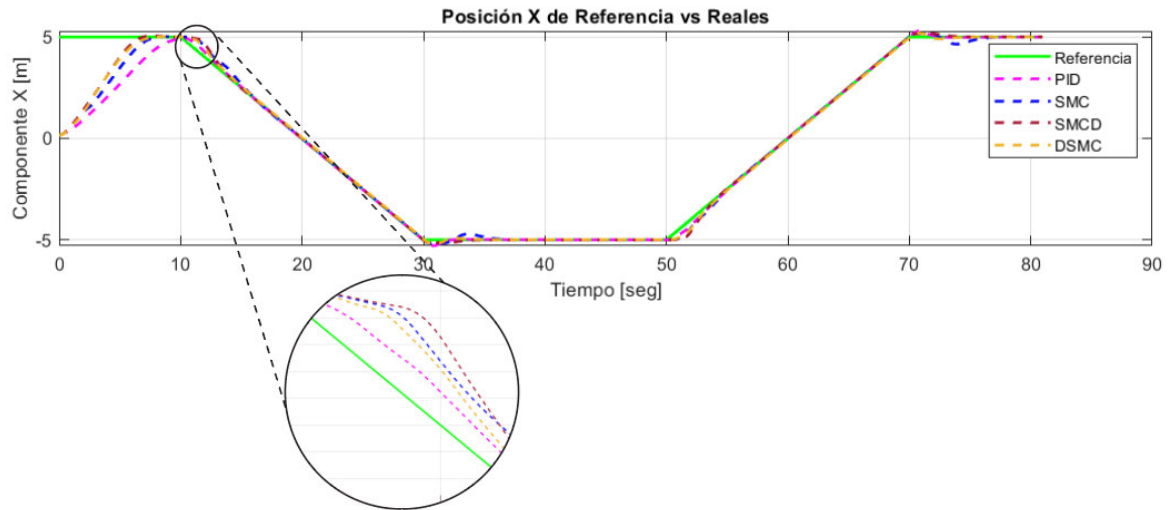


Figura 3.26. Trayectoria de X del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Cuadrada)

En la figura 3.26 y 3.27 se observa el desempeño de los controladores para la componente X del seguimiento de trayectoria. Lo más notorio es la disminución del error, tanto para el estado transitorio como para cada curva de 90° que se tiene en cada curva. En este caso todos los controladores tienen un desempeño similar, siendo los controladores PID y SMC tradicional con el mayor error de $0.5 [m]$, mientras que el controlador SMC-Dual y SMC-Dinámico tienen un error de $0.3 [m]$.

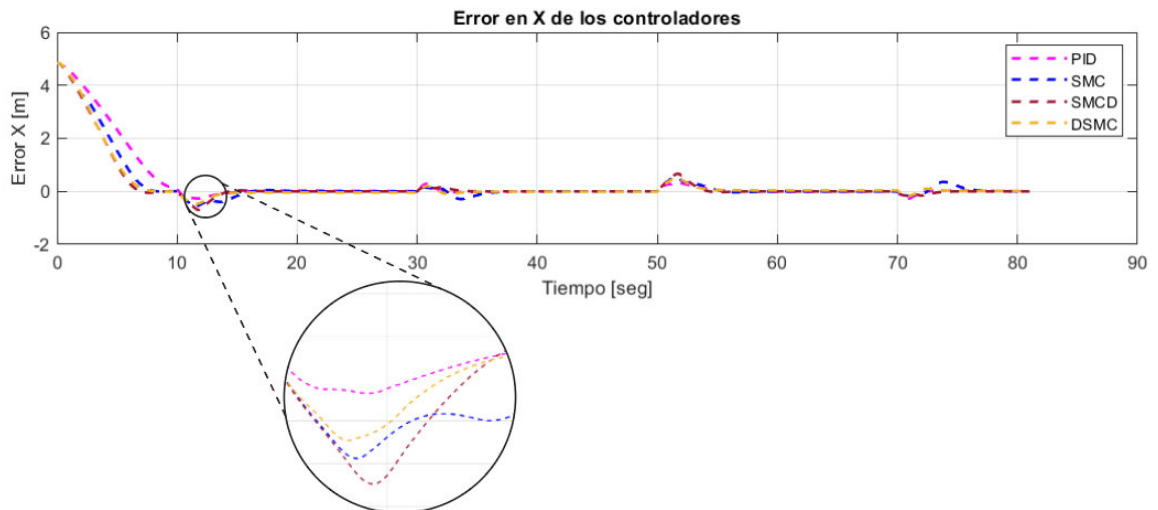


Figura 3.27. Error de trayectoria de X del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Cuadrada)

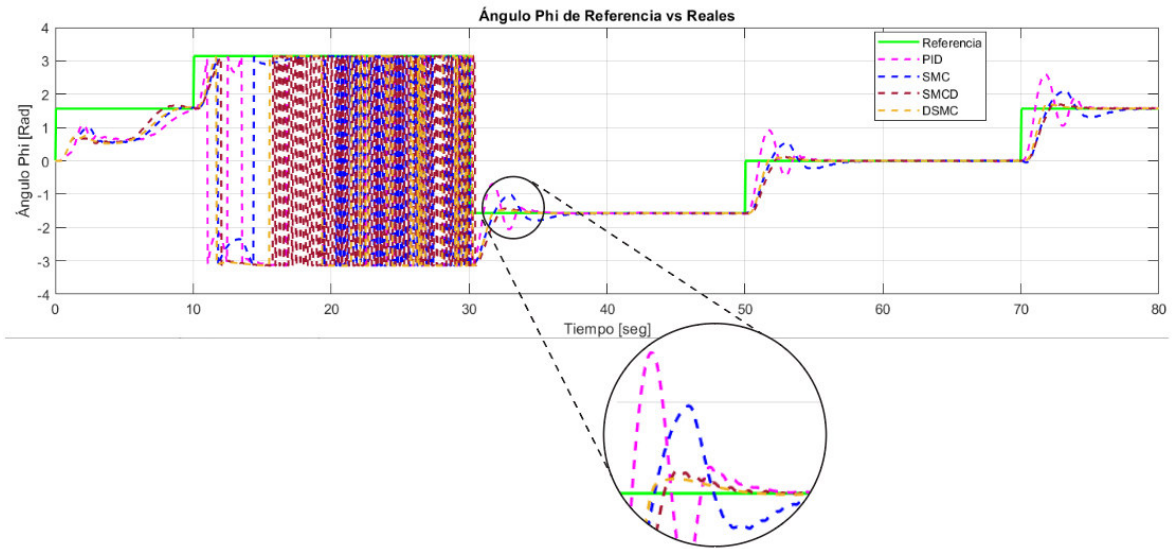


Figura 3.28. Trayectoria de ϕ del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Cuadrada)

En la figura 3.28 se observa una gran oscilación entre los 10 y 30 segundos de simulación por parte de los controladores. Esto es debido a que el software Matlab al ángulo ϕ [rad], una vez pasado los π [rad] lo simula como $-\pi$ [rad], por lo que los controladores al intentar seguir la trayectoria y estabilizar su ángulo en π [rad], oscilan justamente en este límite, causando así esta variación. De igual manera una vez pasado esta oscilación se logra observar que el controlador PID y SMC tradicional tienen el mayor sobreimpulso y tiempo de estabilización, llegando a tener oscilaciones mucho mayores que los controladores SMC-Dual y SMC-Dinámico.

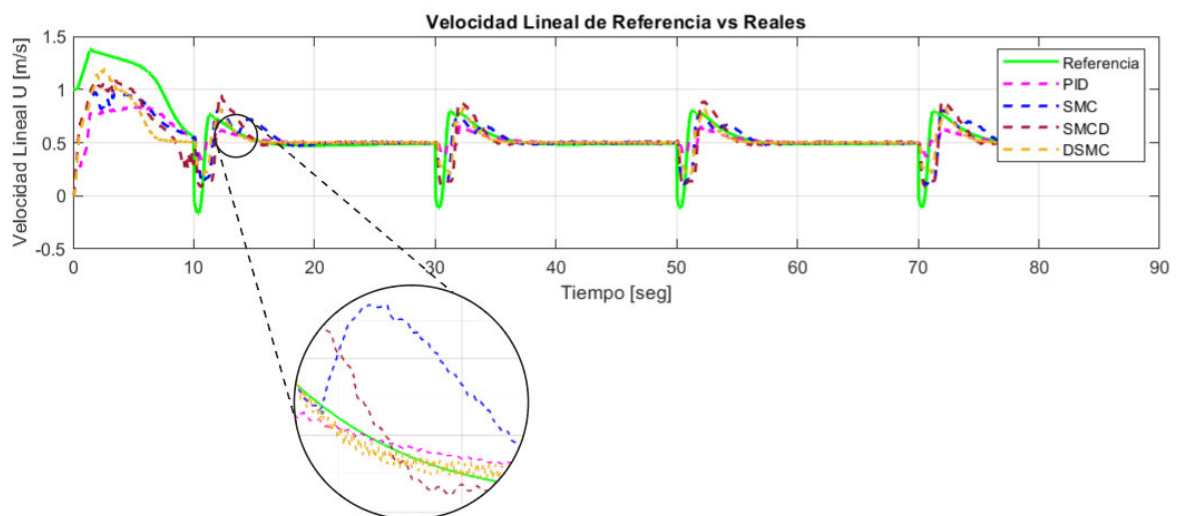


Figura 3.29. Velocidad Lineal u del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Cuadrada)

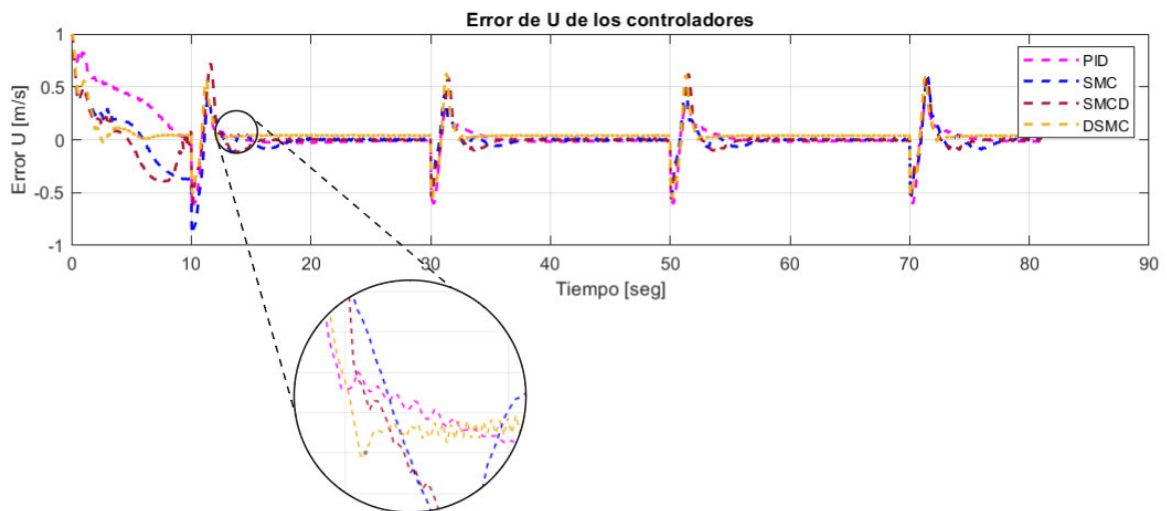


Figura 3.30. Error de la velocidad lineal u del Pioneer 3-DX con los 4 controladores (Trayectoria Cuadrada)

En las figuras 3.29 y 3.30 se observa que la respuesta de los controladores es muy parecida al punto de referencia, teniendo todos un error similar de $0.5 \left[\frac{m}{s} \right]$. En la respuesta transitoria de 0 a 10 segundos se logra observar que el controlador PID tiene mayor error al no alcanzar la velocidad que alcanzan los controladores por modos deslizantes para alcanzar la referencia.

El controlador PID tiene la menor oscilación en las curvas para la velocidad lineal, sin embargo, esto significa en un mayor error, ya que la referencia marcada en color verde oscila entre valores más altos y los controladores por modos deslizantes son los que se mantienen más cerca de la referencia en respuesta transitorias.

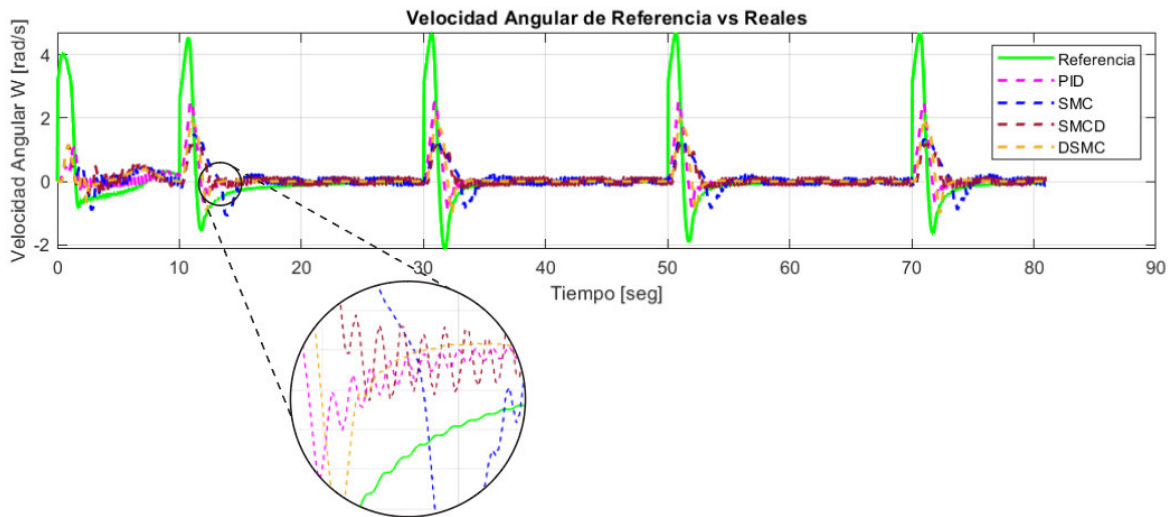


Figura 3.31. Velocidad Angular ω del Pioneer 3-DX con los 4 controladores y su referencia (Trayectoria Cuadrada)

En las figuras 3.31 y 3.32 se observa la respuesta y error de los controladores con respecto a la velocidad angular. Se observa como la velocidad angular tiene fuertes picos desde los 10 segundos, pasando 20 segundos. Esto es debido a las curvas del robot. El controlador con menor sobreimpulso es el controlador PID, sin embargo, tiene un tiempo de establecimiento mayor que el controlador SMC-Dual y SMC-Dinámico.

El controlador SMC tradicional tiene el mayor error y tiempo de establecimiento, siendo los picos negativos hasta un 50% mayores que el resto de los controladores.

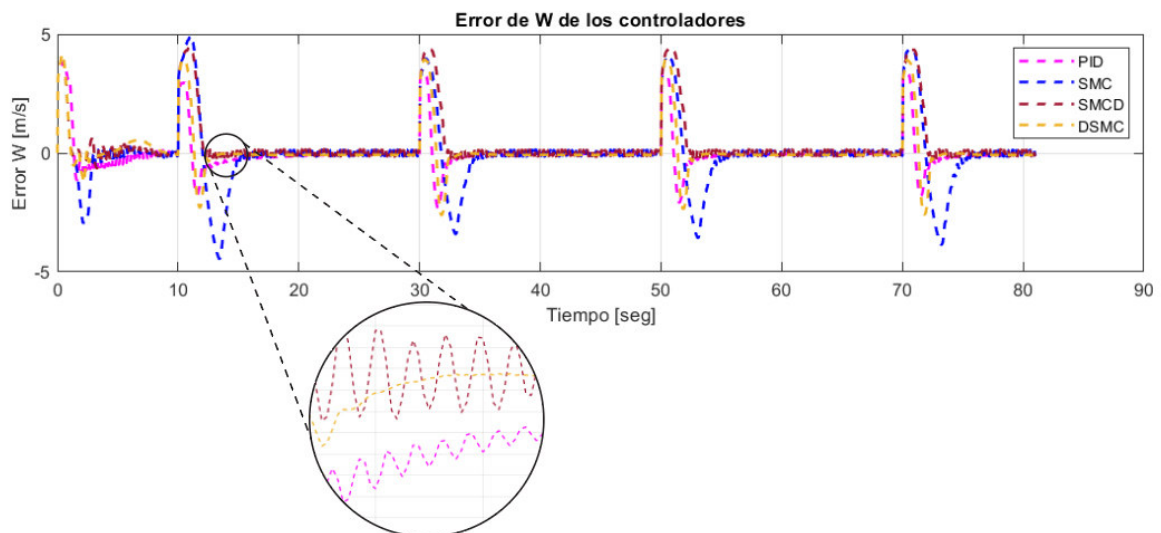


Figura 3.32. Error de la velocidad angular ω del Pioneer 3-DX con los 4 controladores (Trayectoria Cuadrada)

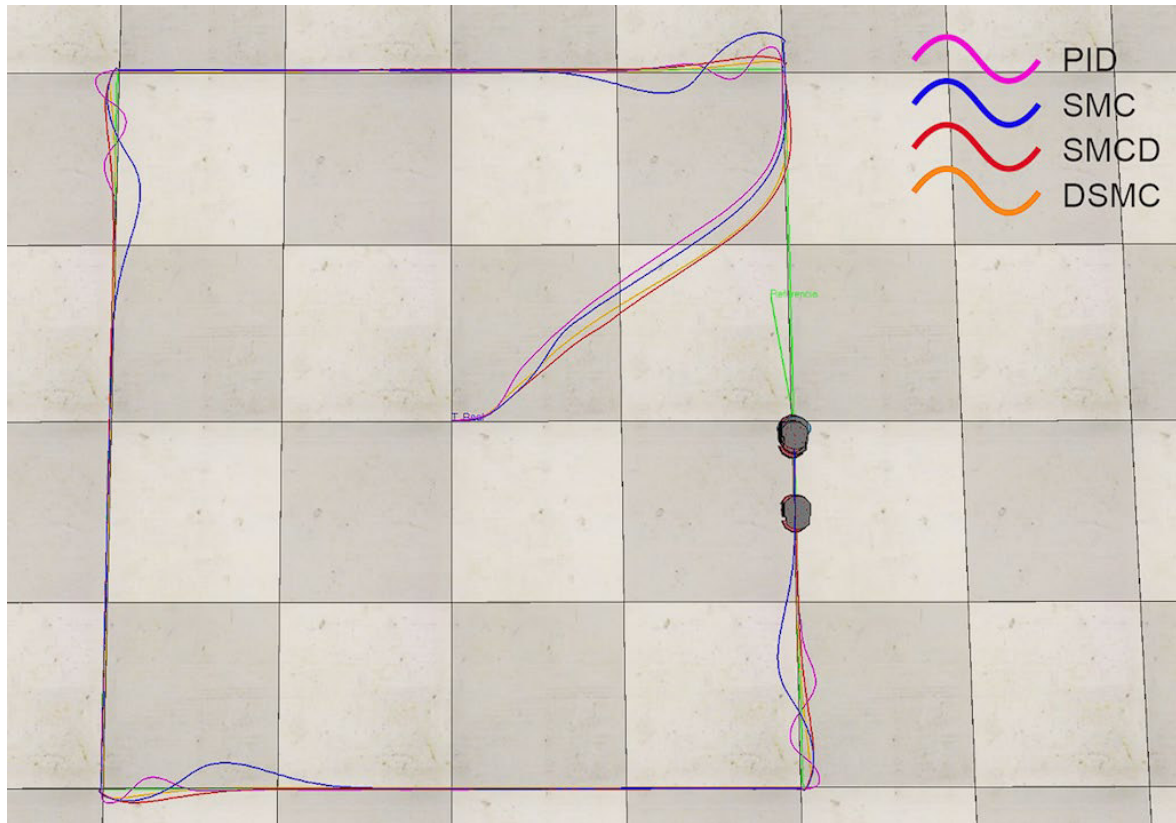


Figura 3.33. Trayectoria cuadrada completa recorrida por el Pioneer 3-DX con los 4 controladores

En la figura 3.33 se puede observar la trayectoria completa realizada por el robot Pioneer 3-DX. Una vez alcanzado el estado estable se puede observar cómo los controladores tienen un comportamiento similar y tienen un error mínimo no diferenciable.

Tabla 3.3 Comparación de ITSE y TVu para los 4 controladores (Trayectoria cuadrada)

Cuadrada

ITSE				
	PID	SMC	SMC-DUAL	DSMC
Velocidad Lineal	2,484	2,258	1,85	1,706
Velocidad Angular	95,29	126,7	64,2	48,43
Posición y	1,638	2,818	1,583	1,11
Posición X	71,74	64,9	57,48	59,21

TVu				
	PID	SMC	SMC-DUAL	DSMC
Velocidad Lineal	51,19	46,49	46,64	46,21
Velocidad Angular	82,86	27,21	23,76	12,65

3.4. Evasión de Obstáculos

3.4.1. Trayectoria Circular

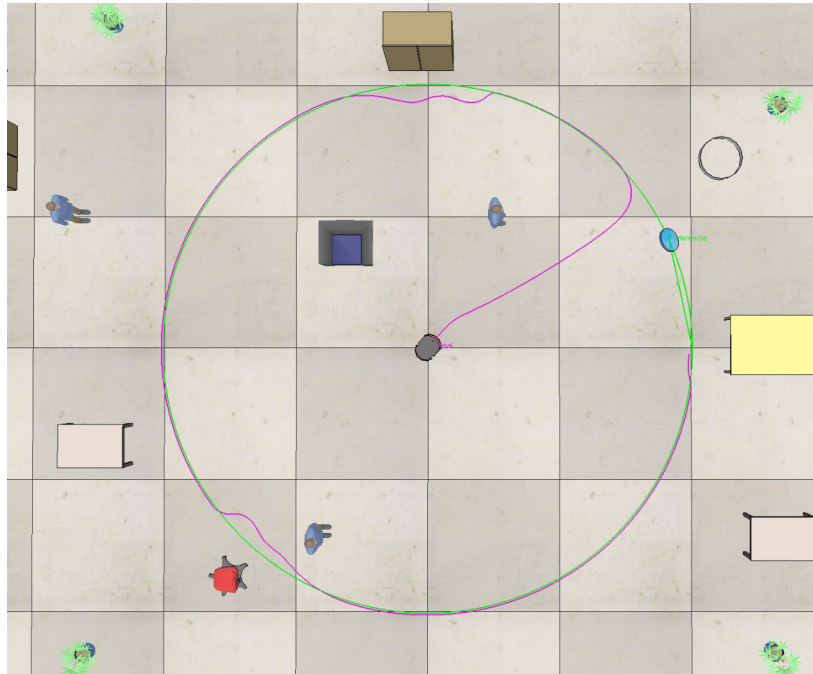


Figura 3.34. Seguimiento de la trayectoria circular con evasión de obstáculos

3.4.2. Trayectoria Lemniscata

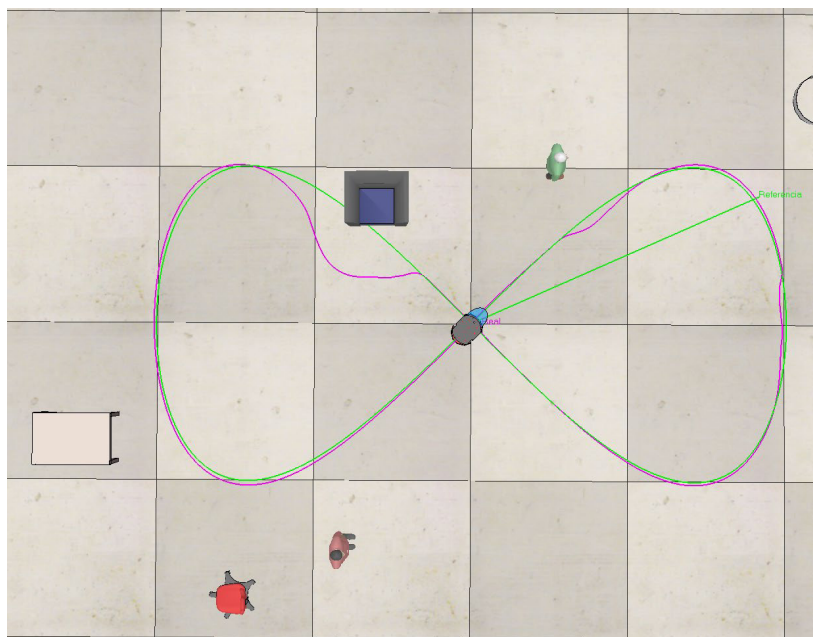


Figura 3.35. Seguimiento de la trayectoria lemniscata con evasión de obstáculos

3.4.2. Trayectoria Cuadrada

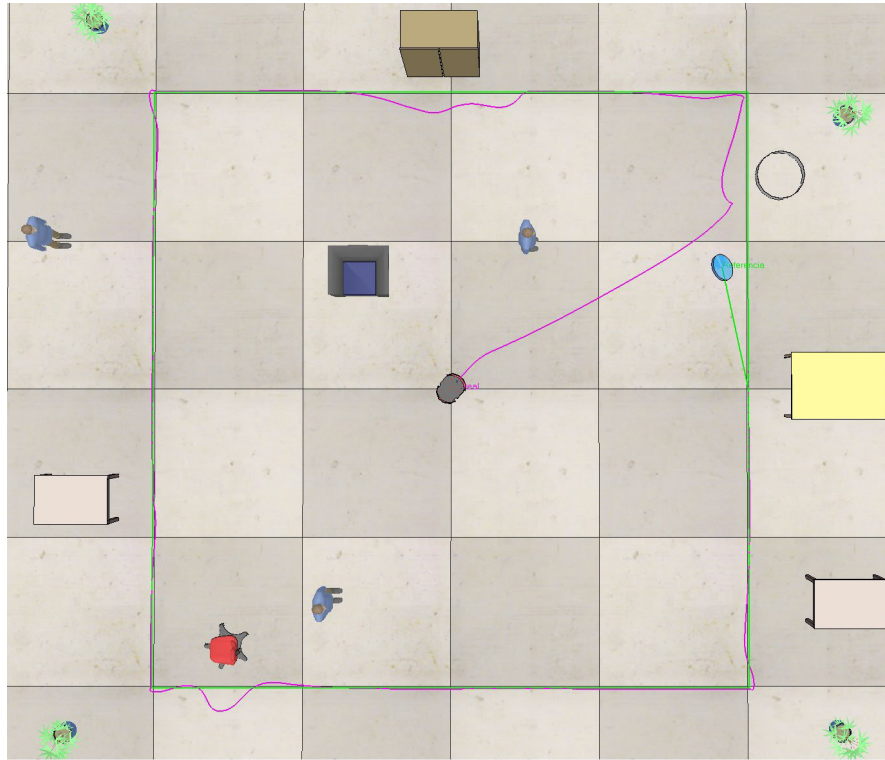


Figura 3.36. Seguimiento de la trayectoria cuadrada con evasión de obstáculos

En las figuras 3.34, 3.35 y 3.36 se observa que la evasión de obstáculos funciona de manera correcta. Cada controlador tiene una respuesta diferente ante la evasión de obstáculos, al igual que para el seguimiento de trayectoria, pero todos logran seguir la trayectoria propuesta. En todos los casos se puede observar una rápida estabilización del controlador una vez evadido el obstáculo, al igual de una desviación mínima de la trayectoria al momento de evadir.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se diseñaron tres controladores por modos deslizantes: SMC, DSMC y DUAL-SMC. Consiguiendo mejorar la respuesta del seguimiento de trayectoria de un robot móvil con los resultados del DSMC y DUAL-SMC. Tomando en cuenta las mediciones obtenidas a partir de los índices de rendimiento ITSE y TVu.

- Se evidenció que el controlador DSMC y DUAL-SMC tienen una respuesta más veloz en la etapa transitoria de seguimiento. Sin aumentar un sobre impulso considerable al compararlos con los controladores tradicionales como el PID y SMC. Se mostró que, en el seguimiento con evasión de obstáculos, los controladores que proporcionan un mejor seguimiento en la etapa transitoria son el DSMC y DUAL-SMC, debido a sus características de diseño.
- Se diseñó el modelo de primer orden con retardo (FOPDT) para la velocidad angular como para la velocidad lineal. Reduciendo el sistema del robot unicycle de un sistema complejo en dos modelos sencillos para los cuales se diseñaron los controladores mencionados anteriormente.
- Al implementar el controlador DSMC se pudo observar que permite mejorar la respuesta, no solo de sistemas con retardos elevados. Si no, también de sistemas con pequeños retardos como es el caso del robot unicycle. Estos resultados se obtuvieron al observar el desempeño de este controlador en las etapas transitorias del seguimiento.
- Se verificó el funcionamiento del SIL al comunicar exitosamente las dos herramientas de software asíncronamente. Esto permitió desarrollar simulaciones en tiempo real, las cuales se asemejan más a una prueba de seguimiento de un robot real.
- Se diseñó una interfaz gráfica mediante el App Designer de Matlab que proporcionó una ayuda visual al usuario para realizar las simulaciones. Además, permitió seleccionar las trayectorias y los controladores de una manera intuitiva. Dentro del GUI se puede visualizar los índices de rendimiento ITSE y TVu que muestran los resultados cuantitativos de cada controlador.

4.2. RECOMENDACIONES

- Los diseños de los controladores propuestos en este trabajo pueden utilizarse como una base para futuros trabajos de seguimiento de trayectoria en robots móviles aplicados en autómatas reales.
- La investigación realizada acerca de los esquemas de control por modos deslizantes DSMC y DUAL-SMC, proporcionan una referencia para futuros trabajos de seguimiento de trayectoria u otras aplicaciones en robots móviles.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Capito y P. Proaño, Seguimiento de Trayectorias Mediante Cuatro Técnicas de Control Utilizando una Plataforma Robótica Pioneer 3DX y el Sistema Operativo Robótico ROS, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [2] O. Camacho y C. Smith, A new approach to desing and tune sliding mode controllers for chemical processes., Tampa: University of Florida, 1996.
- [3] P. Proaño, L. Capito y A. Rosales, «A Dynamical Sliding Mode Control Approach for Long Deadtime Systems,» de *Proceedings of 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, Barcelona, España, 2017.
- [4] C. Obando, D. Chávez, P. Leica y O. Camacho, «Sliding Mode Controller Based on a Hybrid Surface for Tracking Improvement of Non-Linear Processes,» *21th IFAC World Congress*, nº 21, p. 6, 2021.
- [5] I. Adept Technology, «Pioneer 3-DX,» Columbia Drive, Amherst.
- [6] Mathworks, «Simulink Webpage,» 2021. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>. [Último acceso: 06 2021].
- [7] C. Robotics, «CoppeliaSim Webpage,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.coppeliarobotics.com/>. [Último acceso: 05 2021].
- [8] A. M. Mohan, Industria robótica pasará de la automatización fija a los sistemas móviles”, Mundo PMMI, CDMX: PMMI, 2021.
- [9] O. Aquino, Los robots autónomos móviles conquistan nuevos espacios de trabajo al ser más inteligentes, CDMX: PR Newswire, 2020.
- [10] Robotics Online Marketing Team, «Collaborative Robots Market Update,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.automate.org/blogs/collaborative-robots-market-update-2018>. [Último acceso: 05 2020].
- [11] R. Laurette, L. de Saint Vincent, R. Alami, R. Chatila y V. Perebaskine, «Supervision and control of the AMR intervention robot,» *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments*, vol. 2, pp. 1057-1062, 1991.
- [12] R. Andrés, S. Gustavo y D. Fernando, Control Dinámico Mediante Métodos Numéricos Para Robots Móviles Tipo Uniciclo, San Juan: Universidad Nacional de San Juan, 2007.
- [13] L. Morales, M. Herrera, O. Camacho, P. Leica y J. Aguilar, «LAMDA Control Approaches Applied to Trajectory Tracking for Mobile Robots,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37179-37195, 2021.
- [14] J. Campos, S. Jaramillo, L. Morales, O. Camacho y D. Chávez, «PSO Tuning for Fuzzy PD + I Controller Applied to a Mobile Robot Trajectory Control,» *2018*

International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS, pp. 62-68, 2018.

- [15] M. Andaluz y A. Rosales, Modelación, identificación y control de robots móviles, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [16] J. Ruiz-de-Garibay, Robótica: Estado del arte, Bilbao: Universidad de Deusto, 2015.
- [17] Abb, Manual del IRB 140, BRYNE: ABB, 2020.
- [18] ABB, «ABB Robótica,» abb, [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/>. [Último acceso: 05 2021].
- [19] H. Robotics, «Honda Robotics-Asimo,» Honda, [En línea]. Available: <https://www.honda.mx/asimo>. [Último acceso: 05 2020].
- [20] R. González, «El Test de Turing: dos mitos, un dogma,» *Katholieke Universiteit Leuven Revista de Filosofía*, vol. 63, pp. 37-53, 2007.
- [21] H. Robotics, «Sophia-Hanson Robotics,» HANSON ROBOTICS LTD., 2021. [En línea]. Available: <https://www.hansonrobotics.com/sophia/>. [Último acceso: 05 2021].
- [22] PBS, «Engineering Robotic Cameras to Observe Animals in Nature,» PBS & WGBH Educational Foundation, 2021. [En línea]. Available: <https://www.pbslearningmedia.org/resource/nat35-sci-meetspy/engineering-robotic-cameras-to-observe-animals-in-nature/>. [Último acceso: 05 2021].
- [23] All DJI, «DJI All Mavic Pro,» DJI All, 2021. [En línea]. Available: <https://www.dji.com/mavic>. [Último acceso: 05 2021].
- [24] (MIT) Massachusetts Institute of Technology, «Massachusetts Institute of Technology,» [En línea]. Available: <https://biomimetics.mit.edu/>. [Último acceso: 05 2021].
- [25] QUINETIQ, «TALON® Medium-Sized Tactical Robot,» QinetiQ 2021, 2021. [En línea]. Available: <https://www.qinetiq.com/en-us/capabilities/robotics-and-autonomy/talon-medium-sized-tactical-robot>. [Último acceso: 05 2021].
- [26] P. Muir y C. Neuman, Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirection Wheeled Mobile Robot, Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1986.
- [27] DAKA, «The Independence Mobility System IBOT,» Independence technology, 2007. [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20070217222556/http://www.ibotnow.com/>. [Último acceso: 05 2021].
- [28] Robots Mobile Industrial, «Mobile robot transports sterile goods in hospital,» MIR, 2020. [En línea]. Available: <https://www.mobile-industrial->

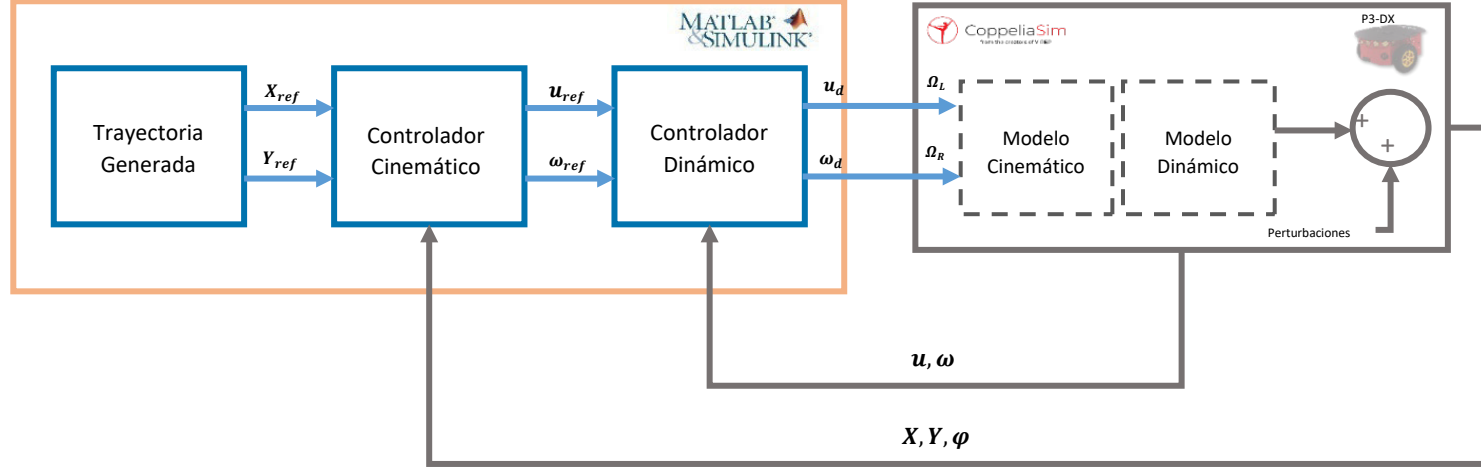
robots.com/en/insights/case-studies/mobile-robot-transport-sterile-goods-in-hospital/. [Último acceso: 05 2021].

- [29] GmbH AGCO, «La última generación de robots de siembra: El Fendt Xaver se hace adulto,» FENDT, 2021. [En línea]. Available: <https://www.fendt.com/es/2-fendt-xaver>. [Último acceso: 2021-05].
- [30] Robots Mobile Industrial, «Mobile robot transports sterile goods in hospital,» MiR, 2021. [En línea]. Available: <https://www.mobile-industrial-robots.com/de/insights/case-studies/mobile-robot-transport-sterile-goods-in-hospital/>. [Último acceso: 05 2021].
- [31] Amazon, «Bienvenido a Amazon Fulfillment,» Amazon.com, 2021. [En línea]. Available: <https://www.aboutamazon.es/centros-log%C3%ADsticos-de-amazon/#:~:text=Amazon%20cuenta%20con%20m%C3%A1s%20de%20175%20centros%20log%C3%ADsticos%20en%20todo,m%C3%A1s%20de%2040%20en%20Europa.&text=Amazon%20cuenta%20con%20m%C3%A1s%20de%20250.000%20empleados%20>. [Último acceso: 05 2021].
- [32] Amazon, «Amazon Robotics,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.amazon.jobs/en-gb/teams/amazon-robotics>. [Último acceso: 05 2021].
- [33] B. Stolyar, «iRobot Roomba s9+ Review,» PCmag, 2019. [En línea]. Available: <https://www.pcmag.com/reviews/irobot-roomba-s9-plus>. [Último acceso: 05 2021].
- [34] O. Camacho y C. Smith, Application of sliding mode control to nonlinear chemical processes with variable deadtime, Bucaramanga: Segundo Congreso de la Asociacion Colombiana de Automatica, 1997.
- [35] V. Braitenber, Vehicles Experiments in Synthetic Psychology, London: The MIT Press, 1984.
- [36] Statista, «Robotic vacuum cleaner market share worldwide from 2014 to 2019, by brand,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.statista.com/statistics/934089/worldwide-robotic-vacuum-cleaner-market-share/>. [Último acceso: 05 2021].
- [37] A. M. Mohan, «Industria robótica pasará de la automatización fija a los sistemas móviles,» *Mundo PMMI*, vol. 1, 2020.

ANEXOS

ANEXO A

Esquema de Control cascada (Controlador Cinemático / Dinámico). Para el seguimiento de trayectoria del Pioneer 3-DX



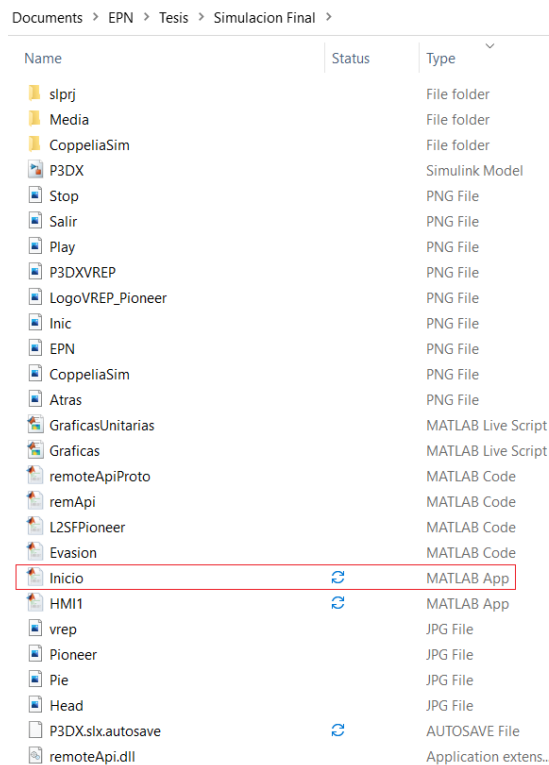
ANEXO B

Manual de Usuario de la Interfaz Gráfica

En este apartado se busca facilitar el manejo del HMI desarrollado al usuario que lo utilice sobre el trabajo de titulación: *Diseño y simulación de tres técnicas de control para el seguimiento de trayectorias en el robot Pioneer 3-DX utilizando CoppeliSim-Simulink*.

Inicialización:

Para arrancar la interfaz de usuario se debe entrar a la carpeta llamada “*Simulación Final*” y dar doble click sobre el archivo llamado “*Inicio*” con la extensión *.mlapp* como se observa en la figura A1, además de abrir la carpeta llamada “*CoppeliaSim*” y dar doble click sobre el archivo llamado “*Seguimiento*”.



Documents > EPN > Tesis > Simulacion Final >

Name	Status	Type
slprj		File folder
Media		File folder
CoppeliaSim		File folder
P3DX		Simulink Model
Stop		PNG File
Salir		PNG File
Play		PNG File
P3DXVREP		PNG File
LogoVREP_Pioneer		PNG File
Inic		PNG File
EPN		PNG File
CoppeliaSim		PNG File
Atras		PNG File
GraficasUnitarias		MATLAB Live Script
Graficas		MATLAB Live Script
remoteApiProto		MATLAB Code
remApi		MATLAB Code
L25FPioneer		MATLAB Code
Evasion		MATLAB Code
Inicio	↻	MATLAB App
HMI1	↻	MATLAB App
vrep		JPG File
Pioneer		JPG File
Pie		JPG File
Head		JPG File
P3DX.slx.autosave	↻	AUTOSAVE File
remoteApi.dll		Application extens...

Figura A1. Arranque de la interfaz de usuario.

Portada

Una vez abierta la aplicación “Inicio” se despliega una ventana con la interfaz desarrollada para que el usuario pueda interactuar, tal como se muestra en la figura A2.



Figura A2. Ventana de portada de la interfaz gráfica.

En esta ventana tenemos 4 zonas en las que el usuario puede interactuar. La zona 1 es el botón de *Ayuda*, al dar click sobre esta sección se despliega este manual para que el usuario pueda solventar dudas del modo de operación de la interfaz gráfica.

El botón 2 indica las opciones de minimizar, maximizar o cerrar la ventana. Al dar click sobre el botón 3, se abre un breve resumen sobre el trabajo de titulación realizado. El botón 4 funciona para proceder a la ventana siguiente.

Interfaz de Usuario

Una vez dado click en el botón de iniciar se despliega una ventana como la mostrada en la figura A3. En esta pestaña encontraremos igualmente los botones

de ayuda y minimizar, maximizar y cerrar, los cuales cumplen las mismas funciones descritas en el apartado de *Portada*. En esa ventana el usuario podrá escoger todos los parámetros necesarios para realizar la simulación del robot P3-DX exitosamente.

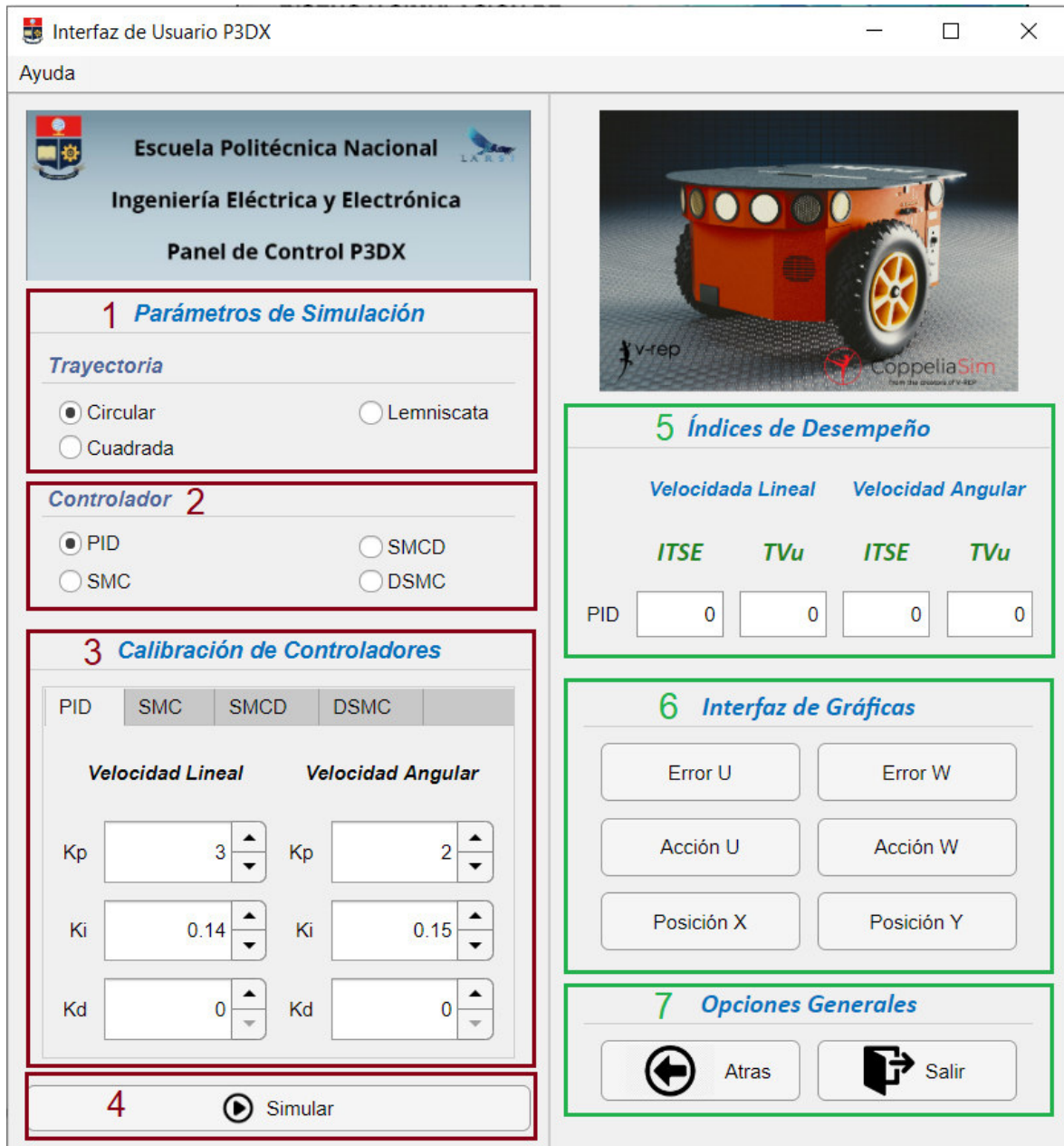


Figura A3. Ventana de Interfaz de Usuario.

En la sección 1 el usuario podrá escoger la trayectoria deseada que desee visualizar en la simulación, mientras que en la sección 2 podrá escoger el controlador que desee que se utilice para poder observar las diferentes respuestas en el seguimiento de trayectorias.

La sección 3 se refiere a la calibración de los parámetros de cada controlador. Cada controlador tiene diferentes parámetros a calibrar. Esta ventana varía dependiendo del controlador escogido en la sección 2 y tienen un valor mínimo de cero, por lo que no se podrán enviar valores negativos a los controladores.

Cabe recalcar que los parámetros descritos en la sección 1,2 y 3 pueden ser modificados mientras corre la simulación, por lo tanto, es posible observar de mejor manera la acción de cada parámetro a configurar. La sección 4 es el botón con el cuál empieza la simulación, este botón debe darse click una vez que se configuren los parámetros presentados en la sección 1,2 y 3.

En la sección 5 se visualiza constantemente como varían los errores ITSE y TVu a través del tiempo mientras corre la simulación. Este apartado igualmente varía según el controlador escogido.

En la sección 6 tenemos 6 botones indicando claramente la gráfica que se va a desplegar en caso de hacer click en alguno de ellos. Estas gráficas se abrirán en una nueva pestaña cada una y se puede observar el desarrollo de cada una de ellas mientras corre la simulación y como varían en función del tiempo.

Por último, en la sección 7 tenemos 2 botones. El botón de *Atrás* retornará a la ventana de *Inicio*, mientras que el botón de salir cerrará totalmente los programas de la interfaz de usuario.

ORDEN DE EMPASTADO