

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE TRES TÉCNICAS DE CONTROL
BASADAS EN SMC CON NO LINEALIDADES Y UN CONTROLADOR
PID BASADO EN SMC PARA EL SEGUIMIENTO DE
TRAYECTORIAS EN EL ROBOT PIONEER 3DX UTILIZANDO
COPPELIASIM-SIMULINK**

TOMO 2

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN.**

LUISA PAOLA BENALCÁZAR ROMERO

luisa.benalcazar@epn.edu.ec

CRISTIAN ALEXANDER BONILLA LEMA

cristian.bonilla@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GEOVANNY DANILO CHÁVEZ GARCÍA PhD.

daniло.chavez@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Luisa Paola Benalcázar Romero declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Luisa Paola Benalcázar Romero

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Luisa Paola Benalcázar Romero, bajo mi supervisión.



Ing. Geovanny Danilo Chávez García, PhD.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Luisa Paola Benalcázar Romero

Cristian Alexander Bonilla Lema

Dr. Ing. Geovanny Danilo Chávez García, PhD.

Ing. Oscar Eduardo Camacho Quintero, PhD.

DEDICATORIA

Este trabajo en conjunto con todo el esfuerzo que ha conllevado llegar hasta aquí, va dedicado en primer lugar a Dios, quien solo con el hecho de despertarme, me ha dado la oportunidad de aprender día a día y de saber enfrentarme a situaciones y retos que me han permitido crecer profesional y personalmente. A mi madre, mi padre y mis hermanas, quienes, con su apoyo incondicional, son el motor principal de inspiración para ir haciendo realidad todos mis sueños y proyectos. Gracias mamá Anita y Yami por ser incondicionales. A mis abuelitos y abuelitas que con sus bendiciones y consejos me han dado la fortaleza para no decaer; a mi estrellita en el cielo Lilita quien, sin duda, sigue cuidándome. A mis tías y primos quienes han sabido ser mi soporte y me han dado toda la ayuda necesaria a lo largo de este camino. A toda mi familia por su aliento en cada momento. A mis amigos y amigas quienes han sabido estar en los momentos más oportunos.

A todos ellos, porque me han sido una pieza fundamental para lograr esta meta.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecer a Dios, quien nunca me ha abandonado y ha puesto las oportunidades y a las mejores personas en los momentos oportunos y más aún en los momentos difíciles a lo largo de este camino.

A mis padres por todo el esfuerzo y sacrificio realizado para apoyarme. A mi madre por ser un ejemplo de fortaleza y trabajo y a la vez de dulzura, paciencia y amor y, por estar en todo momento a mi lado y ser mi aliada en cada decisión. A mi padre por ayudarme a forjar mi carácter y enseñarme que el esfuerzo diario tarde o temprano refleja la recompensa.

A mis hermanitas, a Luciani por ser un pedacito de felicidad en mi vida y a Yami por alegrarme con sus locuras, estar cuando la necesito y por compartir tantos momentos y ser el pilar de soporte una de la otra en cada dificultad.

A mis abuelitos por la confianza que me han dado siempre y por ser modelos de trabajo, dedicación y amor. Gracias por toda la fuerza

A mis tías y tío, a mis primitos y primitas, porque con sus valores bien arraigados de humildad y solidaridad han sabido extenderme una mano, siendo fundamentales en este logro. A toda mi familia por el aliento y las motivaciones a lo largo de mi carrera, gracias a todos.

A Cris con quien hemos realizado el presente trabajo y además hemos encontrado una buena compañía y que la buena amistad que hemos formado vaya más allá de culminar con esta etapa universitaria.

A todos mis amigos y amigas que hice dentro y fuera de la universidad, pues son como una segunda familia para mí, porque han hecho más fácil llevar este arduo camino; agradecida siempre de contar con tan maravillosas personas ya que han estado en los mejores y peores momentos, y que ese apoyo que nos hemos sabido dar, nunca acabe para que todos cumplamos nuestros proyectos.

Gracias a todos los profesores que han compartido sus conocimientos y su esencia como personas porque con ello más que profesionales han formado humanos al servicio de nuestra sociedad. Un agradecimiento especial a Óscar Camacho y Danilo Chávez, quienes han guiado el presente trabajo, su dedicación y amor por lo que hacen, se refleja en cada estudio que han presentado y en la huella que dejan en cada profesional que tiene la oportunidad de trabajar junto a ustedes, nunca renuncien a esa entrega con la que laboran.

Sin duda las palabras no son suficientes para agradecer a todos quienes han formado parte de esta linda experiencia y meta alcanzada. Muchas gracias de corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
2 INTRODUCCIÓN	10
2.2 Objetivo general	11
2.3 Objetivos específicos	11
2.4 Alcance	12
2 METODOLOGÍA.....	13
2.4 Diseño de controladores	13
2.4.2 Controlador SMC.....	13
2.4.3 pid basado en smc	16
2.4.4 CONTROLADOR DE superficie no lineal con pi lineal.....	19
2.4.5 CONTROLADOR DE superficie lineal con pi no lineal.....	21
2.4.6 CONTROLADOR DE superficie no lineal con pi no lineal.....	22
2.5 Comunicación Simulink/Coppeliasim	23
2.6 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	25

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
3.2 SintonizaCIÓN DE CONTROLADORES	27
3.2.1 PID basado en SMC	27
3.2.2 Controlador de superficie no lineal con PI lineal	28
3.2.3 Controlador de superficie lineal con PI no lineal	29
3.2.4 Controlador de superficie no lineal con PI no lineal	31
3.3 pruebas de funcionamiento	32
3.3.1 Pruebas con trayectoria circular	33
3.3.2 Pruebas con trayectoria cuadrangular	40
3.4 Índices de desempeño	48
3.4.1 Índices para trayectoria circular	48
3.4.2 Índices para trayectoria cuadrangular	49
3.5 Conclusiones	50
3.6 Recomendaciones	52
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
5 ANEXOS	54
ANEXO I	54

RESUMEN

En la actualidad la robótica tiene un desarrollo avanzado y está presente en muchas de las aplicaciones industriales, comerciales y domésticas donde se necesita de mucha precisión, alta eficiencia y velocidad de funcionamiento en las que la mano del hombre ya no es suficiente para cumplir con dichos requerimientos. La mayoría de las aplicaciones están basadas en algoritmos de seguimiento de trayectorias, a partir de la cual se derivan otras funcionalidades como la evasión de obstáculos, exploración, Delivery, etc. Para esto es necesario desarrollar esquemas de control que cumplan con un mínimo de error el seguimiento de una trayectoria determinada.

Los controladores deben cumplir con ciertos parámetros que ayuden a mejorar la eficiencia, la robustez y la estabilidad de los sistemas, además de poder soportar la no linealidad de los procesos. Así, surgen ideas de controladores robustos y óptimos como los controladores por modos deslizantes (SMC) que mejoran el desempeño de un controlador PID tradicional. A partir de los cuales se han generado nuevas variaciones de esquemas de control denominados como controladores basados en SMC que buscan mejorar los resultados de un controlador SMC. Es así como en el presente documento se pretende ampliar la visión de control con nuevos esquemas de regulación para el seguimiento de trayectorias con los controladores PID basados en SMC que involucren no linealidades en la superficie deslizante como en el control PID de superficie para mejorar el desempeño del sistema.

El proyecto se divide en dos tomos, en el primer tomo se desarrolla el capítulo uno concerniente al marco teórico sobre sistemas de control, métodos de aproximación, robótica móvil, índices de desempeño, teoría de los controladores propuestos, análisis del robot Pioneer P3DX, y parte del capítulo dos acerca de la obtención de modelos aproximados de velocidad lineal y angular del robot móvil, esquema de generación de trayectorias y el controlador cinemático de posición.

En el segundo tomo se desarrolla el resto del capítulo dos acerca de la matemática de controladores basados en SMC con la inclusión de no linealidades, el diseño de cada controlador propuesto, parámetros calculados y sintonizados, la comunicación entre los programas CoppeliaSim y Simulink, y el capítulo tres donde se analiza los resultados obtenidos en base a los índices de desempeño, se presenta las conclusiones,

recomendaciones del trabajo de titulación y se anexa al final la descripción del funcionamiento de la aplicación desarrollada en AppDesigner de Matlab para la simulación y presentación de resultados de este proyecto.

PALABRAS CLAVE: Seguimiento de Trayectoria, Robot Móvil, Pioneer P3DX, Matlab, Simulink, CoppeliaSim, Control por Modos Deslizantes, PID, PID basado en SMC.

ABSTRACT

Today robotics has an advanced development and is present in many industrial, commercial and domestic applications where high precision, high efficiency and speed of operation are needed and where the human hand is no longer sufficient to fulfill these requirements. Most applications are based on trajectory tracking algorithms, from which other functionalities such as obstacle avoidance, exploration, delivery, etc. are derived. For this, it is necessary to develop control schemes that achieve with a minimum of error the tracking of a given trajectory.

The controllers must comply with certain parameters that help to improve the efficiency, robustness, and stability of the systems, in addition to supporting the nonlinearity of the processes. Thus, ideas of robust and optimal controllers arise such as sliding mode controllers (SMC) that improve the performance of a traditional PID controller. From which have been generated new variations of control schemes called SMC-based controllers that aim to improve the results of an SMC controller. Thus, this paper aims to expand the control vision with new regulation schemes for trajectory tracking with PID controllers based on SMC involving nonlinearities in the sliding surface as in the surface PID control to improve system performance.

The project is divided into two volumes, the first volume develops chapter one concerning the theoretical framework on control systems, approximation methods, mobile robotics, performance indexes, theory of the proposed controllers, analysis of the Pioneer P3DX robot, and part of chapter two about obtaining approximate models of linear and angular velocity of the mobile robot, trajectory generation scheme and the kinematic position controller.

The second volume develops the rest of chapter two about the mathematics of SMC-based controllers with the inclusion of nonlinearities, the design of each proposed controller, calculated and tuned parameters, the communication between CoppeliaSim and Simulink software, and chapter three where the results obtained based on the performance indexes are analyzed, the conclusions and recommendations of the degree work are presented and the description of the operation of the application developed in AppDesigner of Matlab for the simulation and presentation of the results of this project is appended.

KEYWORDS: Trajectory Tracking, Mobile Robot, Pioneer P3DX, Matlab, Simulink, CoppeliaSim, Sliding Mode Control, PID, SMC-based PID.

2 INTRODUCCIÓN

La robótica móvil es una herramienta utilizada a una amplia variedad de aplicaciones que ayudan al ser humano a mejorar la realización de ciertos procesos complejos, que requieran de un alto nivel de precisión, mayor velocidad o que son hechos en lugares peligrosos para la intervención del hombre.

La robótica móvil abarca muchas disciplinas complejas como la inteligencia artificial, mecánica, sistemas de control, automatización, informática y más. Con esto se logran diseñar y fabricar autómatas dedicados para la exploración, monitoreo, elaboración de mapas cartográficos, misiones de exploración extra planetarias, inspección y mantenimiento de equipos, aplicaciones de transporte y entrega, misiones de búsqueda y rescate, entre otras [1].

Entre los avances más icónicos de la robótica móvil constan el robot Sojourner Rover, diseñado por la NASA para la exploración del planeta Marte. Este dispositivo autónomo se desplazaba por la superficie del planeta con el fin de fotografiar el lugar y enviar dicha información a la Tierra [2]. Un caso similar corresponde a los robots Spirit Rover y Opportunity Rover, que hoy en día se encuentran explorando el mismo planeta en búsqueda de mantos acuíferos.

Como es evidente, el manejo de los robots móviles es necesario para un avance tecnológico de la sociedad. Para ejecutar estas tareas es necesario conocer la teoría que abarca la fabricación y control de robots móviles. La misma que es extensa y sigue en aumento a la par del desarrollo de la tecnología. El control de robots móviles parte con la modelación de los sistemas, los robots móviles por sus características son procesos complejos no lineales [3]. Aun así, pueden ser regulados de manera sencilla utilizando modelos cinemáticos en lugar de modelos dinámicos. Si bien es cierto, el simplificar modelos implica limitar los puntos de operación del sistema, no resulta un problema importante puesto que los sistemas de control actuales ofrecen mayor robustez y estabilidad ante diferentes referencias incluso con la presencia de perturbaciones externas.

Entre los controladores robustos que se han aplicado en la industria se encuentra el controlador en modo deslizante (SMC) con el que se obtuvo resultados superiores a un PID tradicional [4]. Esta técnica de regulación ha sido utilizada de manera común en procesos químicos mas no a sistemas robóticos, por ello en este documento se propone la aplicación de un esquema de control denominado PID basado en SMC desarrollado en [5]

con la inclusión de no linealidades en la superficie y en el controlador PID aplicado al robot móvil Pioneer P3DX. Para lo cual se utiliza el modelado cinemático con restricción no holonómica mejorada de un robot móvil Pioneer P3DX para la obtención de funciones de transferencia de primer orden más retardo que aproximen la respuesta de la velocidad lineal y angular del robot. En base a lo obtenido se procede a diseñar los esquemas de control basados en SMC para el seguimiento de trayectorias circular y cuadrada.

Los esquemas mencionados son el resultado de la combinación de los controladores SMC tradicionales, los controladores PID convencionales y la inclusión de no linealidades mediante el método propuesto por Han. En total se diseñaron cuatro controladores, el desarrollo y los resultados obtenidos, así como la aplicación desarrollada se presentan en el contenido de los dos tomos de este proyecto.

2.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular tres técnicas de control basadas en SMC con no linealidades y un controlador PID basado en SMC para el seguimiento de trayectorias en el robot Pioneer 3DX utilizando CoppeliaSim-Simulink.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar la investigación realizada por Li, Mingzhong; Wang, Fuli; Gao, Furong de controladores basados en SMC con no linealidades aplicados a procesos químicos y adaptarlos para el control de seguimiento de trayectorias del robot móvil Pioneer 3DX.
2. Diseñar tres algoritmos de control basados en SMC con no linealidades para el seguimiento de trayectorias del robot móvil PIONEER 3DX: 1. Superficie tipo PID lineal y controlador de superficie PI no lineal aplicando el método de Han, 2. Superficie tipo PID no lineal usando el método de Han y controlador de superficie PI lineal, 3. Superficie PID no lineal por el método de Han y controlador de superficie PI no lineal por el método de Han, y un controlador PID basado en SMC. A partir del modelo de primer orden reducido con retardo para su aplicación en el sistema propuesto.

3. Simular el seguimiento de trayectorias de los controladores diseñados en el software CoppeliaSim y Matlab/Simulink.
4. Realizar una comparación entre los algoritmos de control diseñados, mediante el cálculo de los índices de desempeño ISE, T_{vu} , tiempo de establecimiento y máximo sobre impulso.
5. Desarrollar una interfaz gráfica en AppDesigner de Matlab que permita seleccionar el tipo de controlador a simular y visualizar los índices de desempeño ISE y T_{vu} .

2.4 ALCANCE

1. Se realizará una recopilación de información sobre el seguimiento de trayectoria de robots móviles mediante el uso del modelo cinemático, para obtener un modelo de primer orden más retardo.
2. Se estudiará el esquema de control basado en SMC con superficie deslizante no lineal y control de superficie lineal y el esquema de control PID basado en SMC con no linealidades introducidas por el método de Han.
3. Se simulará el seguimiento de trayectorias: circular y cuadrada con cada controlador diseñado con los programas Matlab/Simulink y CoppeliaSim.
4. Se desarrollará una aplicación de software en appDesigner de Matlab para mostrar el seguimiento de trayectorias y los índices de desempeño ISE, T_{vu} , tiempo de establecimiento y máximo sobre impulso.

2 METODOLOGÍA

2.4 DISEÑO DE CONTROLADORES

2.4.2 CONTROLADOR SMC

El controlador en modo deslizante es la base de la cual surge los controladores propuestos en este documento. Por ello es necesario realizar el desarrollo matemático para obtener la ecuación de la parte continua del controlador que será aplicada para regular la velocidad lineal y angular del robot móvil.

A continuación, se presenta el diseño de un controlador SMC a partir del modelo de primer orden más retardo de un sistema [3]. El término de tiempo muerto puede ser aproximado mediante el primer término de la serie de Taylor:

$$e^{\theta s} \cong \frac{1}{\theta s + 1} \quad (2.1)$$

Al sustituir el término en la función de transferencia de primer orden más retardo se obtiene lo siguiente:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} = \frac{K}{(\tau s + 1)(\theta s + 1)} \quad (2.2)$$

Mostrando la expresión en forma de ecuación diferencial

$$\theta \tau \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + (\theta + \tau) \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = KU(t) \quad (2.3)$$

La ecuación de superficie en base al error se presenta en la ecuación (2.4)

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int_0^t e(t) dt \quad (2.4)$$

Al resolver la ecuación de la superficie deslizante de (2.4), con $n=2$ se obtiene (2.5).

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t) dt \quad (2.5)$$

Donde $\lambda_1 = 2\lambda$ y $\lambda_0 = \lambda^2$ son índices de sintonización para la superficie y para el equivalente continuo del componente equivalente que componen el controlador SMC.

Se procede a cumplir la condición:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 \quad (2.6)$$

De donde se obtiene:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d^2e(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de(t)}{dt} + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (2.7)$$

Al reemplazar la definición de error $e(t) = R(t) - Y(t)$ en la ecuación (2.7):

$$\frac{d^2R(t)}{dt^2} - \frac{d^2Y(t)}{dt^2} + \lambda_1 \left(\frac{dR(t)}{dt} - \frac{dY(t)}{dt} \right) + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (2.8)$$

Reemplazando la derivada de mayor orden de la ecuación (2.3) en la ecuación (2.8) y despejando $U(t)$, que en adelante se denominará $U_c(t)$:

$$U_c(t) = \left(\frac{\theta\tau}{K} \right) \left[\left(\frac{\theta + \tau}{\theta\tau} - \lambda_1 \right) \frac{dY(t)}{dt} + \frac{Y(t)}{\theta\tau} + \lambda_0 e(t) + \frac{d^2R(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{dR(t)}{dt} \right] \quad (2.9)$$

En [3] se afirma que se puede eliminar las derivadas de la referencia de la ecuación anterior sin afectar el desempeño del controlador continuo. Así:

$$U_c(t) = \left(\frac{\theta\tau}{K}\right) \left[\left(\frac{\theta + \tau}{\theta\tau} - \lambda_1\right) \frac{dY(t)}{dt} + \frac{Y(t)}{\theta\tau} + \lambda_0 e(t) \right] \quad (2.10)$$

Si se toma en cuenta que $\lambda_1 = \frac{\theta + \tau}{\theta\tau}$, la ecuación (2.4) se simplifica en:

$$U_c(t) = \left(\frac{\theta\tau}{K}\right) \left[\frac{Y(t)}{\theta\tau} + \lambda_0 e(t) \right] \quad (2.11)$$

Además, para asegurar que el sistema tenga una respuesta sobre amortiguada se debe cumplir que: $\lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4}$.

La parte discontinua del controlador está dada por la ecuación (2.12) cuyo funcionamiento se detalla en el Tomo 1 de este proyecto.

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (2.12)$$

De esta manera, el controlador SMC completo tiene la forma de:

$$U(t) = \left(\frac{\theta\tau}{K}\right) \left[\frac{Y(t)}{\theta\tau} + \lambda_0 e(t) \right] + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (2.13)$$

La superficie $S(t)$ queda definida como:

$$S(t) = \text{sign}(K) \left(-\frac{dY(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.14)$$

Donde el signo de K (ganancia de la planta) determina la acción del controlador.

La sintonización de los parámetros del controlador no es sencilla y muchas veces es realizada por conocimiento del ingeniero de control o de manera heurística. Sin embargo, en [3] se propone las siguientes funciones para empezar la sintonización del controlador SMC:

$$\lambda_1 = \frac{\theta + \tau}{\theta\tau} \quad (2.15)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\theta + \tau}{\theta\tau} \right)^2 \quad (2.16)$$

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left(\frac{\tau}{\theta} \right)^{0.76} \quad (2.17)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|K_D\lambda_1 \quad (2.18)$$

Las ecuaciones presentadas sirven para determinar el valor inicial de los parámetros de la parte continua y discreta del control SMC. A pesar de eso, la parte discontinua no es usada, de tal manera que K_D y δ no son calculados en este documento.

Para encontrar los valores finales de las variables λ_0 y λ_1 se utilizó una sintonización basada en mejorar los índices de desempeño ISE y T_{vu} . Los valores obtenidos para cada esquema de control se muestran en el capítulo 3.

2.4.3 PID BASADO EN SMC

La propuesta del esquema de control de un PID basado en SMC se puede visualizar en la Figura 2.1. Partiendo de que el objetivo es que el robot móvil Pioneer 3DX siga las trayectorias deseadas, se controla tanto la velocidad lineal como la velocidad angular que acerquen al robot real a las posiciones en x y y del robot virtual, disminuyendo así el error de seguimiento. El esquema general de regulación descrito en el capítulo anterior (Tomo1) se lo aplica para controlar el seguimiento de trayectorias del robot móvil. Las variaciones del esquema de control son cuatro, la primera de ellas consiste en aplicar el esquema de control SMC sustituyendo la acción discreta por un controlador PI de superficie.

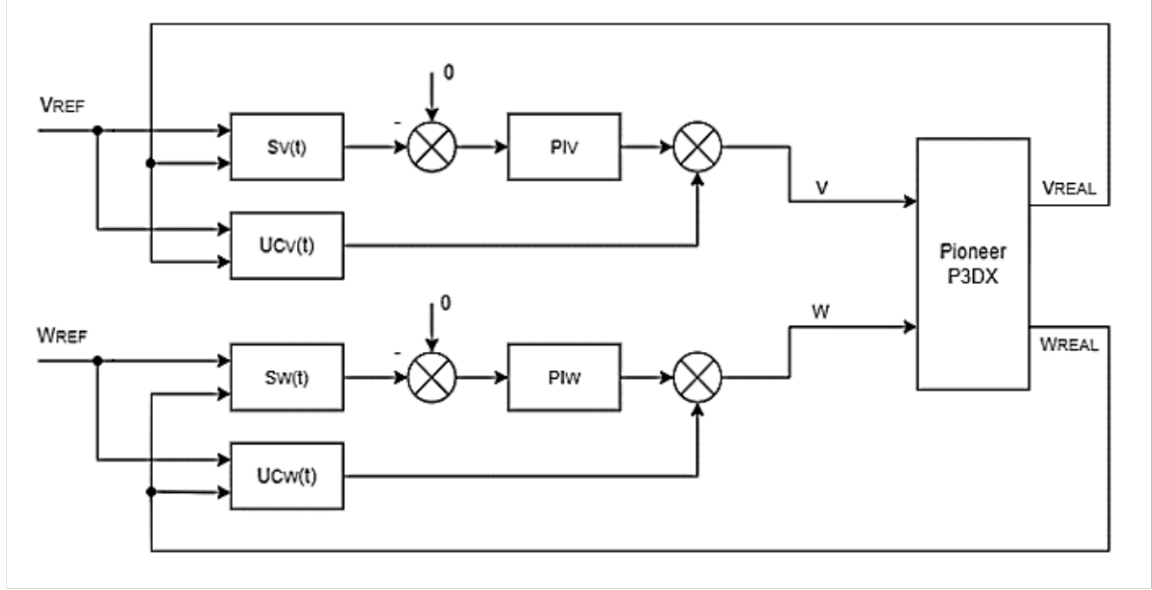


Figura 2.1. Esquema de control PI basado en SMC.

De acuerdo con el esquema presentado, las superficies $S(t)$ de velocidad lineal V y angular W , están definidas según (2.19) y (2.20)

$$S_V(t) = \text{sign}(K_V) \left(-\frac{dV_{REAL}(t)}{dt} + \lambda_{1V} e_V(t) + \lambda_{0V} \int_0^t e_V(t) dt \right) \quad (2.19)$$

$$S_W(t) = \text{sign}(K_W) \left(-\frac{dW_{REAL}(t)}{dt} + \lambda_{1W} e_W(t) + \lambda_{0W} \int_0^t e_W(t) dt \right) \quad (2.20)$$

Los controladores PI de superficie de velocidad lineal y angular son descritos por (2.21) y (2.22) respectivamente.

$$PI_V(t) = K_{S_V} \left[e_{S_V}(t) + \frac{1}{\tau_{i_{S_V}}} \int_0^t e_{S_V} dt \right] \quad (2.21)$$

$$PI_W(t) = K_{SW} \left[e_{SW}(t) + \frac{1}{\tau_{iSW}} \int_0^t e_{SW}(t) dt \right] \quad (2.22)$$

La sintonización de los parámetros del control PI también se determinan de manera heurística tratando de minimizar el valor de los índices de desempeño ISE y Tvu. El mismo método se aplica para los cuatro esquemas de control.

Las señales de control de la componente continua se describen con (2.23) la de velocidad lineal y (2.24) de velocidad angular.

$$U_{cV}(t) = \left(\frac{\theta_V \tau_V}{K_V} \right) \left[\frac{V_{REAL}(t)}{\theta_V \tau_V} + \lambda_{0V} e_V(t) \right] \quad (2.23)$$

$$U_{cW}(t) = \left(\frac{\theta_W \tau_W}{K_W} \right) \left[\frac{W_{REAL}(t)}{\theta_W \tau_W} + \lambda_{0W} e_W(t) \right] \quad (2.24)$$

Donde:

K_V : Ganancia en estado estable de la función de transferencia de velocidad lineal

θ_V : Tiempo muerto de la función de transferencia de velocidad lineal

τ_V : Constante de tiempo de la función de transferencia de velocidad lineal

$e_V(t) = V_{REF}(t) - V_{REAL}(t)$: error de velocidad lineal

$\lambda_{1V} = \frac{\theta_V + \tau_V}{\theta_V \tau_V}$: parámetro de sintonización de la superficie de velocidad lineal

$\lambda_{0V} = \frac{1}{4} \left(\frac{\theta_V + \tau_V}{\theta_V \tau_V} \right)^2$: parámetro de sintonización de la superficie de velocidad lineal

K_W : Ganancia en estado estable de la función de transferencia de velocidad angular

θ_W : Tiempo muerto de la función de transferencia de velocidad angular

τ_W : Constante de tiempo de la función de transferencia de velocidad angular

$e_W(t) = W_{REF}(t) - W_{REAL}(t)$: error de velocidad angular

$\lambda_{1W} = \frac{\theta_W + \tau_W}{\theta_W \tau_W}$: parámetro de sintonización de la superficie de velocidad angular

$\lambda_{0W} = \frac{1}{4} \left(\frac{\theta_W + \tau_W}{\theta_W \tau_W} \right)^2$: parámetro de sintonización de la superficie de velocidad angular

K_{S_V} : Ganancia proporcional del controlador de superficie de velocidad lineal

$\tau_{i_{S_V}}$: Tiempo integral del controlador de superficie de velocidad lineal

$e_{S_V}(t) = -S_V(t)$: es el error de superficie de velocidad lineal

K_{S_W} : Ganancia proporcional del controlador de superficie de velocidad angular

$\tau_{i_{S_W}}$: Tiempo integral del controlador de superficie de velocidad angular

$e_{S_W}(t) = -S_W(t)$: es el error de superficie de velocidad angular

2.4.4 CONTROLADOR DE SUPERFICIE NO LINEAL CON PI LINEAL

El siguiente esquema de control mostrado en la Figura 2.2 incluye las configuraciones no lineales con respecto a las superficies $S_V(t)$ y $S_W(t)$ respectivamente.

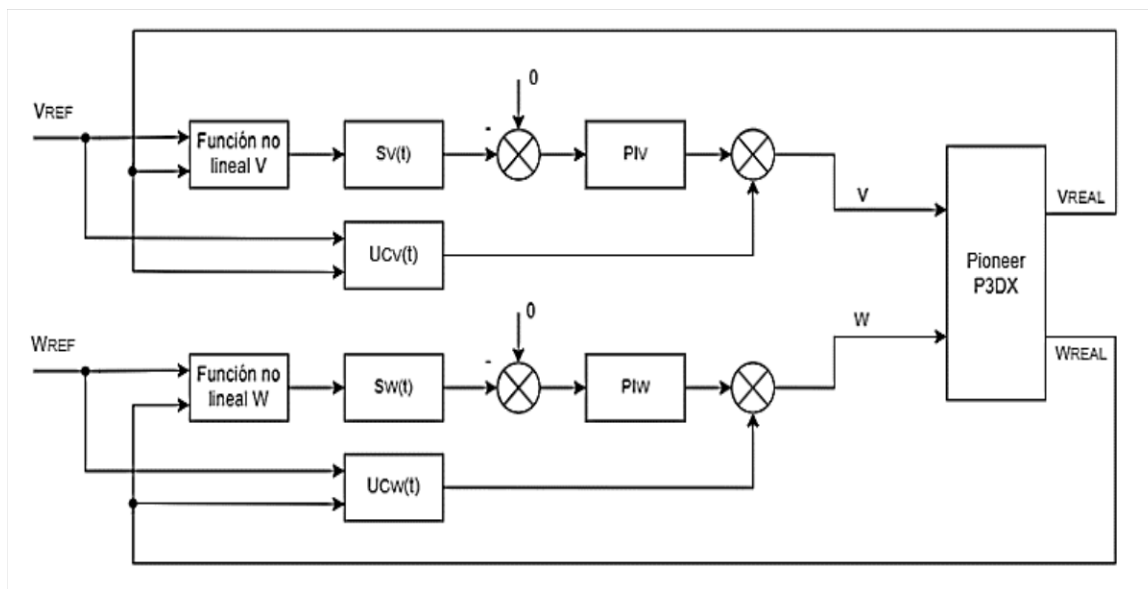


Figura 2.2. Esquema del controlador de superficie no lineal con PI lineal.

La inclusión de las no linealidades que modifica el error, la integral del error y la derivada del error para la velocidad lineal y angular se realizan mediante el método de Han descrito según las funciones (2.25) y (2.26).

$$\psi(x_V, \alpha_{x_V}, \delta_{x_V}) = \begin{cases} |x_V|^{\alpha_{x_V}} \text{sign}(x_V), & \text{si } |x_V| > \delta_{x_V} \\ \delta_{x_V}^{\alpha_{x_V}-1} x_V, & \text{si } |x_V| < \delta_{x_V} \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\psi(x_W, \alpha_{x_W}, \delta_{x_W}) = \begin{cases} |x_W|^{\alpha_{x_W}} \text{sign}(x_W), & \text{si } |x_W| > \delta_{x_W} \\ \delta_{x_W}^{\alpha_{x_W}-1} x_W, & \text{si } |x_W| < \delta_{x_W} \end{cases} \quad (2.26)$$

De las funciones descritas a trozos tanto para la velocidad lineal como para la velocidad angular, el parámetro δ se ajusta teniendo en cuenta el rango de variaciones de la parte proporcional, integral y derivativo; mientras que el parámetro α se lo puede sintonizar de acuerdo con la tabla 1.1 descrita en el Tomo 1. [6]

Donde el valor de x_V toma el valor del error de velocidad, la integral del error de velocidad y la derivada del error de velocidad, aplicando el mismo concepto para x_W .

α_{x_V} determina la respuesta de la región no lineal para el error, integral del error o derivada del error de la velocidad lineal.

δ_{x_V} delimita el área de la región lineal para el error, integral del error o derivada del error de la velocidad lineal.

α_{x_W} determina la respuesta de la región no lineal para el error, integral del error o derivada del error de la velocidad angular.

δ_{x_W} delimita el área de la región lineal para el error, integral del error o derivada del error de la velocidad angular.

La ecuación de superficie, del control PI de superficie y del componente continuo del controlador tanto para la velocidad lineal como para la angular son las ecuaciones mostradas en las ecuaciones (2.19)(2.19) - (2.24), respectivamente.

De igual manera, la sintonización de las funciones no lineales se realiza de manera heurística tratando de mejorar los índices de desempeño mencionados anteriormente.

2.4.5 CONTROLADOR DE SUPERFICIE LINEAL CON PI NO LINEAL

A diferencia de los esquemas anteriores, en este esquema se tiene como controlador de superficie un controlador PI no lineal de velocidad angular y de velocidad lineal como se observa en la Figura 2.3.

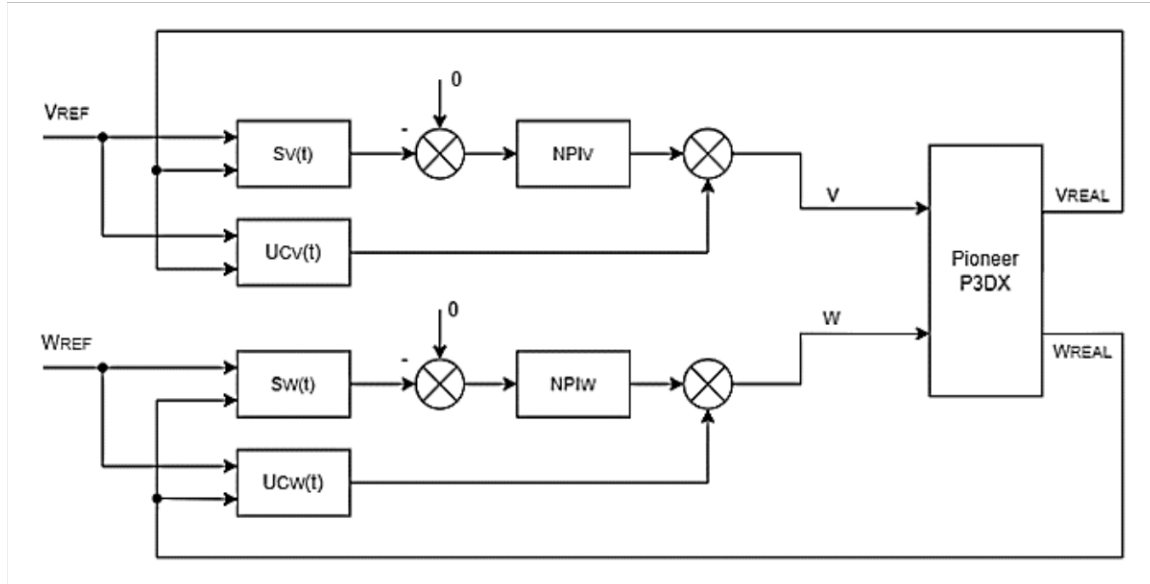


Figura 2.3. Esquema de controlador de superficie lineal con un PI no lineal.

Al controlador de superficie se lo ha reemplazado por un controlador PI no lineal propuesto por Han, el cual describe sus funciones a continuación:

$$NPI_V = K_{p_V} \psi(e_{p_V}, \alpha_{p_V}, \delta_{p_V}) + K_{i_V} \psi(e_{i_V}, \alpha_{i_V}, \delta_{i_V}) + K_{d_V} \psi(e_{d_V}, \alpha_{d_V}, \delta_{d_V}) \quad (2.27)$$

$$NPI_W = K_{p_W} \psi(e_{p_W}, \alpha_{p_W}, \delta_{p_W}) + K_{i_W} \psi(e_{i_W}, \alpha_{i_W}, \delta_{i_W}) + K_{d_W} \psi(e_{d_W}, \alpha_{d_W}, \delta_{d_W}) \quad (2.28)$$

Donde:

K_{p_V}, K_{p_W} : son las ganancias de la acción proporcional del controlador de superficie lineal y angular respectivamente.

K_{i_V}, K_{i_W} : son las ganancias de la acción integral del controlador de superficie lineal y angular respectivamente

K_{p_d}, K_{d_w} : son las ganancias de la acción derivativa del controlador de superficie lineal y angular respectivamente

Las funciones no lineales ψ para las superficies de velocidad lineal (2.27) y de velocidad angular (2.28) son las mostradas (2.25) y (2.26) en cada caso, a diferencia que la función se aplica al error, integral del error y derivada del error de superficie de la velocidad lineal y angular.

La ecuación de superficie y del componente continuo del controlador tanto para la velocidad lineal como para la angular son las ecuaciones mostradas en (2.19), (2.20), (2.23) y (2.24), respectivamente.

2.4.6 CONTROLADOR DE SUPERFICIE NO LINEAL CON PI NO LINEAL

El último esquema de control propuesto se muestra en la Figura 2.4, este resulta de una combinación de los esquemas antes detallados, ya que se usan las mismas ecuaciones tanto de no linealidad para la superficie como del controlador PI no lineal aplicadas para la velocidad y angular.

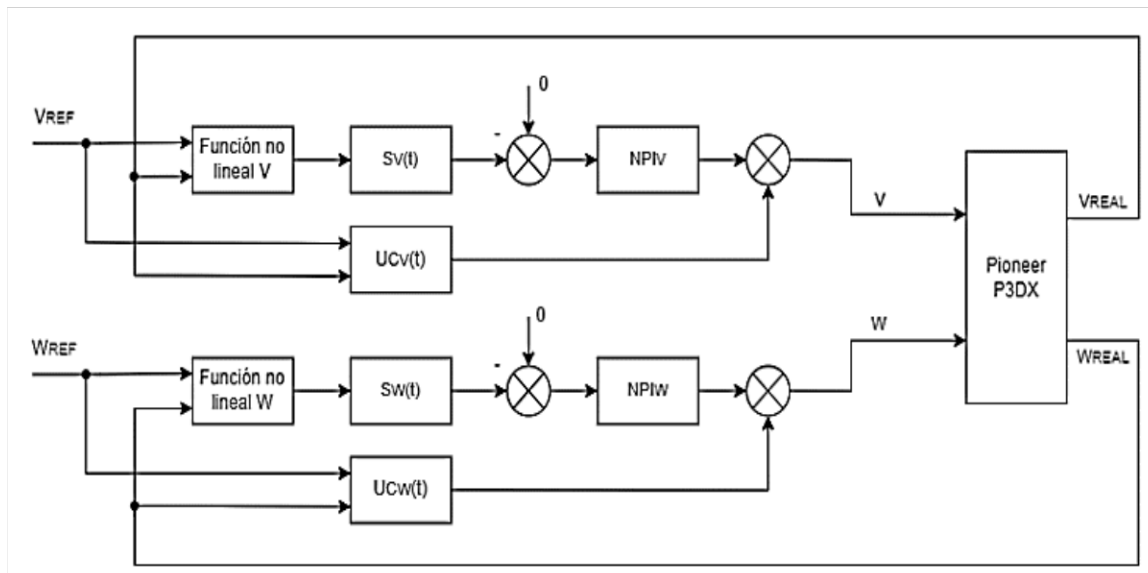


Figura 2.4. Esquema de controlador de superficie no lineal con PI no lineal.

Las ecuaciones de superficie corresponden a (2.19) y (2.20), las funciones no lineales de superficie son (2.25) y (2.26), y los controladores NPIs de superficie a (2.27) y (2.28), tanto para la velocidad lineal como para la velocidad angular.

2.5 COMUNICACIÓN SIMULINK/COPPELIASIM

Simulink es un entorno de desarrollo para recrear y simular modelos en base a diagramas de bloque [5]. Este software desarrollado por Mathworks es usado en el campo de la ingeniería y ofrece herramientas o librerías de las áreas eléctricas, procesos químicos, sistemas mecánicos, sistemas de control, procesamiento de señales, electrónica de potencia, sistemas autónomos y robótica, inteligencia artificial, y más.

CoppeliaSim es un software orientado al trabajo con robots, ofrece un entorno de desarrollo integrado que puede operar de manera conjunta con otras plataformas como puede ser el caso de Matlab mediante los denominados clientes remotos API [6]. La plataforma tiene la capacidad de simular el funcionamiento de sistemas robóticos para diferentes aplicaciones como manipuladores robóticos, robots móviles para el seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos, entre otros.

El presente proyecto hace uso de las dos plataformas para realizar el seguimiento de trayectorias del robot móvil Pioneer 3DX. Los esquemas de control presentados anteriormente y las ecuaciones desarrolladas se ensamblan en diagramas de bloques presentes en Simulink, es decir, es aquí donde se generan las trayectorias deseadas, se calculan los errores y señales de control correspondientes que deben ser aplicadas al robot móvil. CoppeliaSim por su parte es encargado de recibir las señales enviadas desde Simulink con las que se simulará el funcionamiento del robot móvil.

Es importante que ambos programas trabajen en la misma base de tiempo para que no sean afectados por el tiempo de latencia que aparece por la comunicación y simulación en cada programa. Para esto las simulaciones se trabajan de manera síncrona bajo un mismo tiempo de muestreo de 50 [ms]. La comunicación sincrónica se detalla en la Figura 2.5.

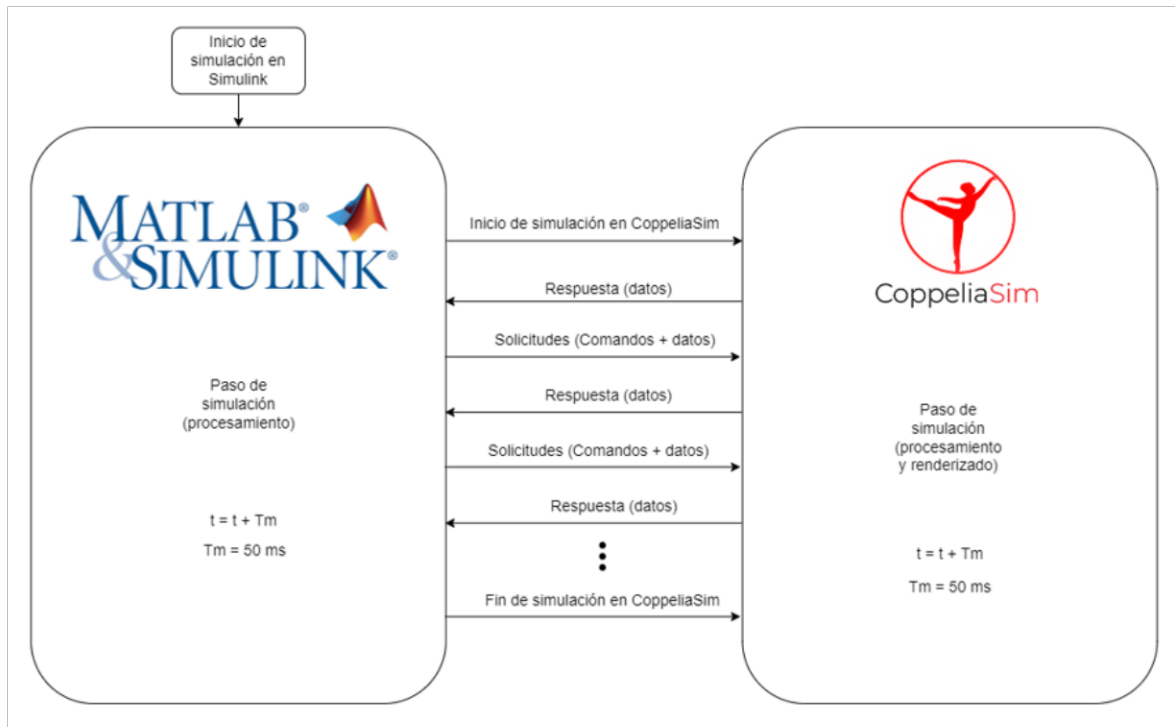


Figura 2.5. Comunicación sincrónica entre Simulink y CoppeliaSim

La configuración del software CoppeliaSim no es compleja y es suficiente con elegir correctamente el tiempo de cada paso de simulación y el tipo de simulación (más o menos precisa). Sin embargo, Simulink requiere de la configuración de la denominada S-Function, que virtualmente representa un bloque que se encarga de inicializar la simulación, enviar comandos y datos, recibir datos y finalizar la comunicación con el programa CoppeliaSim.

Las partes o funciones de la S-Function utilizada son:

- Function Setup: Configura el bloque S-Function determinando el número de puertos de entrada y salida, la dimensión, tipo de dato y realimentación de cada puerto, y las funciones que estarán disponibles dentro de la S-Function.
- Function SetInpPortFrameData: Determina el tipo de muestreo de cada puerto del bloque S-Function.
- Function Start: Inicializa la comunicación sincrónica entre ambos programas. Guarda los handles o referencias de los objetos de CoppeliaSim de los que se requiere acceder a un dato o configurar un dato, como son las ruedas izquierda y derecha, el robot Pioneer P3DX, y más.

- Function Outputs: Se encarga de consultar datos específicos al programa CoppeliaSim que serán realimentados al esquema de control en Simulink para el procesamiento y obtención de señales de control que deben ser reenviados a CoppeliaSim. También se encarga de normalizar los datos que recibe desde CoppeliaSim para que puedan ser procesados correctamente en Simulink.
- Function Update: Esta función es encargada de enviar los datos y comandos desde Simulink hacia CoppeliaSim. Para ello hace un preprocesamiento de estos con el fin de normalizar las unidades, calcular velocidades de cada rueda.
- Function Terminate: Se ejecuta cuando se haya terminado el tiempo de simulación en Simulink, envía el comando de terminar la simulación del programa CoppeliaSim, y finaliza la comunicación entre ambos programas.

2.6 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

El desarrollo de una interfaz gráfica de usuario es indispensable para que el ser humano interactúe con un programa, una máquina, un sitio web entre otros. De esta manera una interfaz gráfica hace que el usuario entienda de mejor manera datos, gráficas, resultados y simulaciones que se presenten en un ambiente gráfico, el cual debe ser entendible y fácil de usar para una persona.

Una interfaz grafica ayuda a que el usuario ejecute tareas de forma sencilla y eficaz de la aplicación que esté usando, por ello esta cuenta con un entorno que contiene menús despegables, pestañas de navegación, menús de selección, botones, espacios para muestra de gráficas, disponiendo estos elementos de manera armónica y que sea entendible para el usuario. [9]

Como se menciona en el apartado anterior, se usan dos programas para que se comuniquen entre ellos; sin embargo, se desarrolla una interfaz gráfica de usuario con la ayuda de App Designer herramienta de Matlab, usando pestañas de navegación, menús de selección para que la visualización de resultados de la simulación del seguimiento de trayectorias del robot Pioneer 3DX con los controladores implementados, botones para ejecutar la simulación e indicadores para visualizar el estado de la simulación [10]. En la Figura 2.6 se muestra una de las pestañas de la interfaz gráfica que se desarrolló en el presente trabajo para que el usuario interactúe con la misma y pueda observar y analizar los resultados de manera más práctica.

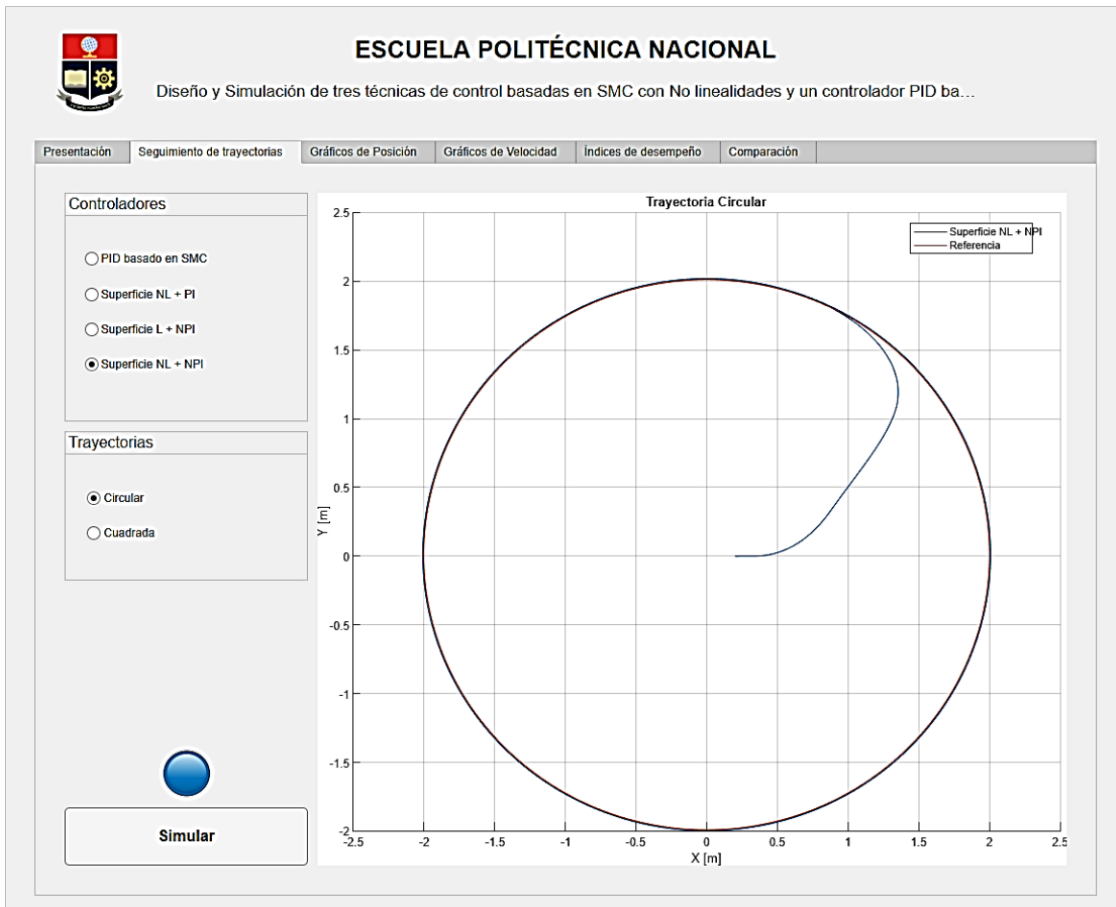


Figura 2.6. Muestra de la Interfaz Gráfica desarrollada con App Designer.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.2 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

Los controladores basados en SMC fueron sintonizados en base las ecuaciones descritas en el capítulo 2 con pequeños ajustes para mejorar la respuesta del sistema. Dicha sintonización se realizó de manera experimental en base a los resultados de las múltiples simulaciones ejecutadas tratando de minimizar los índices de desempeño.

Los parámetros de controladores PI y NPI que corresponde al controlador proporcional integral y al controlador proporcional integral no lineal respectivamente, y de la función no lineal propuesta por Han, fueron calculados de manera heurística hasta conseguir una respuesta acertada y conforme a las limitaciones físicas del sistema en este caso del robot Pioneer P3DX.

3.2.1 PID BASADO EN SMC

Para el controlador PID basado en SMC se calcularon mediante las ecuaciones (2.15) y (2.16) para λ_1 y λ_0 respectivamente tanto para la velocidad lineal V como para la velocidad angular W , los parámetros de los controladores proporcional e integral se sintonizaron de manera experimental, ajustando los valores a de acuerdo con la mejor respuesta y se muestran en *Tabla 3.1* y *Tabla 3.2*.

Tabla 3.1 Parámetros de sintonización con el controlador PID basado en SMC para velocidad lineal.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
λ_{0v}	384.2454	384.2454
λ_{1v}	39.2044	31.3635
K_{Sv}	-	-0.0075
τ_{iSv}	-	0.833

Tabla 3.2 Parámetros de sintonización con el controlador PID basado en SMC para velocidad angular.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
λ_{0w}	1718.3	859.1547
λ_{1w}	82.9050	82.9050
K_{Sw}	-	-0.0014
τ_{iSw}	-	14.2857

3.2.2 CONTROLADOR DE SUPERFICIE NO LINEAL CON PI LINEAL

Para el controlador propuesto en donde la superficie es no lineal, los parámetros calculados se refieren a (2.15) y (2.16), los demás descritos en *Tabla 3.3* y *Tabla 3.4*.

Tabla 3.3 Parámetros de sintonización con el controlador de superficie no lineal con PI lineal para velocidad lineal.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
α_{pv}	-	0.8
α_{iv}	-	0.8
δ_{pv}	-	0.2
δ_{iv}	-	0.3
λ_{0v}	384.2454	384.2454
λ_{1v}	39.2044	31.3635
K_{Sv}	-	-0.0075
τ_{iSv}	-	0.833

Tabla 3.4 Parámetros de sintonización con el controlador de superficie no lineal con PI lineal para velocidad angular.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
α_{p_w}	-	0.8
α_{i_w}	-	0.8
δ_{p_w}	-	0.2
δ_{i_w}	-	0.3
λ_{0_w}	1718.3	859.1547
λ_{1_w}	82.9050	82.9050
K_{s_w}	-	-0.011
$\tau_{i_{s_w}}$	-	16.667

3.2.3 CONTROLADOR DE SUPERFICIE LINEAL CON PI NO LINEAL

Se usan los mismos valores de λ_0 y λ_1 de velocidad lineal y angular sintonizados en los casos anteriores, los nuevos parámetros se siguen sintonizando de manera heurística basándose en la mejor respuesta con el sistema y se detallan en **Tabla 3.5** y **Tabla 3.6**

Tabla 3.5 Parámetros de sintonización con el controlador de superficie lineal con PI no lineal para velocidad lineal.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
λ_{0v}	384.2454	384.2454
λ_{1v}	39.2044	31.3635
K_{pv}	-	-0.0075
α_{pv}	-	1.2
δ_{pv}	-	0.8
$K_{iv}\psi$	-	-0.009
α_{iv}	-	1.2
δ_{iv}	-	0.2

Tabla 3.6 Parámetros de sintonización con el controlador de superficie lineal con PI no lineal para velocidad angular.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
λ_{0w}	1718.3	859.1547
λ_w	82.9050	82.9050
K_{pw}	-	-0.0052
α_{pw}	-	1.2
δ_{pw}	-	0.8
$K_{iw}\psi$	-	-0.009
α_{iw}	-	1.2

δ_{i_w}	-	0.2
----------------	---	-----

3.2.4 CONTROLADOR DE SUPERFICIE NO LINEAL CON PI NO LINEAL

Para el último controlador propuesto se toma en cuenta los parámetros sintonizados en los casos anteriores y, en la mayoría de ellos se mantienen los valores. A continuación, se muestran los parámetros de este controlador.

Tabla 3.7 Parámetros de sintonización con el controlador de superficie no lineal con PI no lineal para velocidad lineal.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
α_{p_V}	-	0.8
α_{i_V}	-	0.8
δ_{p_V}	-	0.3
δ_{i_V}	-	0.2
λ_{0_V}	384.2454	384.2454
λ_{1_V}	39.2044	31.3635
K_{p_V}	-	-0.0052
α_{p_V}	-	1.2
δ_{p_V}	-	0.8
$K_{i_V} \psi$	-	-0.009
α_{i_V}	-	1.2
δ_{i_V}	-	0.2

Tabla 3.8 Parámetros de sintonización con el controlador de superficie no lineal con PI no lineal para velocidad angular.

Parámetro	Parámetro Calculado	Parámetro Sintonizado
α_{pW}	-	1.3
α_{iW}	-	1.5
δ_{pW}	-	0.6
δ_{iW}	-	0.3
λ_{0W}	1718.3	859.1547
λ_{1W}	82.9050	82.9050
K_{pW}	-	-0.0052
α_{pW}	-	1.2
δ_{pW}	-	0.8
$K_{iW}\psi$	-	-0.009
α_{iW}	-	1.2
δ_{iW}	-	0.2

3.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Las pruebas de funcionamiento se realizan bajo las mismas condiciones iniciales y bajo las mismas trayectorias con el fin de realizar una comparación del funcionamiento de los controladores desarrollados mediante el cálculo de los índices de desempeño.

3.3.1 PRUEBAS CON TRAYECTORIA CIRCULAR

La prueba para el seguimiento de la trayectoria circular se realiza con una circunferencia de radio de 2 [m]. En la Figura 3.1 se evidencia los resultados.

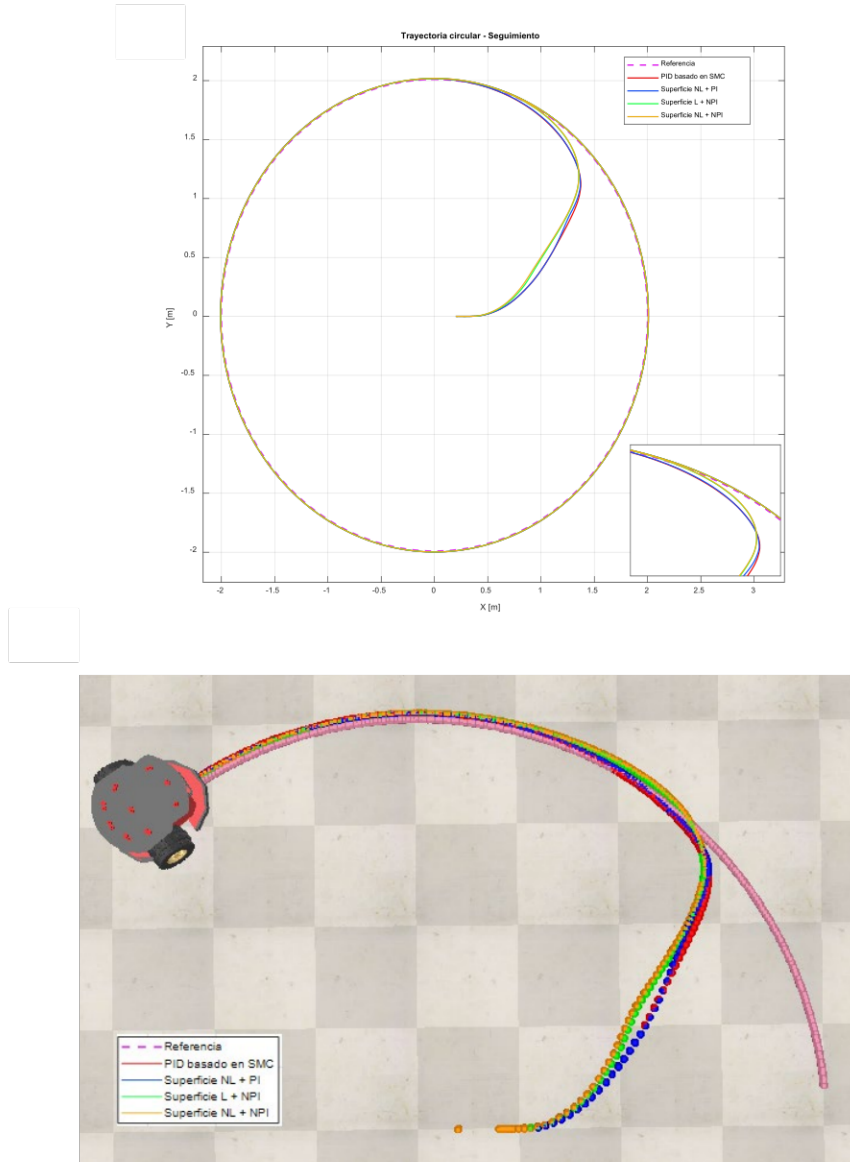


Figura 3.1. Respuesta de los controladores para el seguimiento de trayectoria circular, a) Simulink, b) CoppeliaSim

Si se observa la esquina inferior derecha en donde se realiza un acercamiento de los controladores que se encuentran próximos a llegar a la referencia se examina que el tanto los controladores de superficie lineal como el de superficie no lineal con el controlador

proporcional integral no lineal en cada uno, presentan una reacción más pronta en alcanzar la referencia circular. En cuanto que los controladores PID basado en SMC y el controlador de superficie no lineal con PI lineal tardan más en alcanzar la referencia; sin embargo luego de alcanzar la consigna, los cuatro controladores siguen rigurosamente la circunferencia trazada como trayectoria.

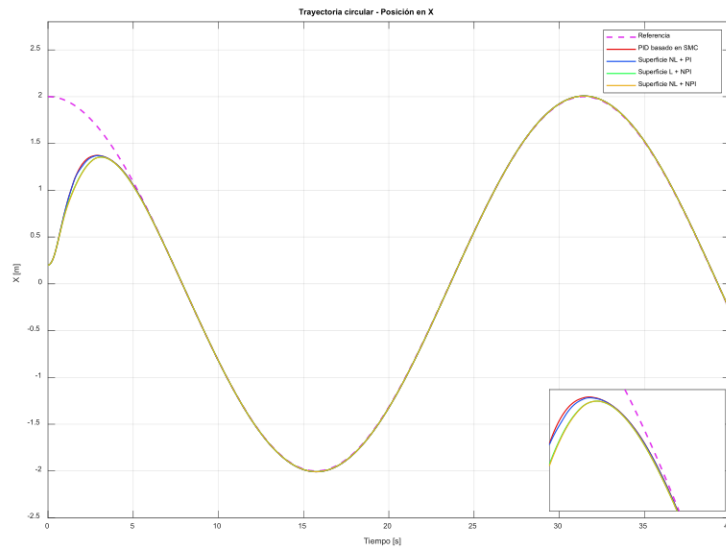


Figura 3.2. Respuesta de los controladores para la posición en X con respecto a la trayectoria circular.

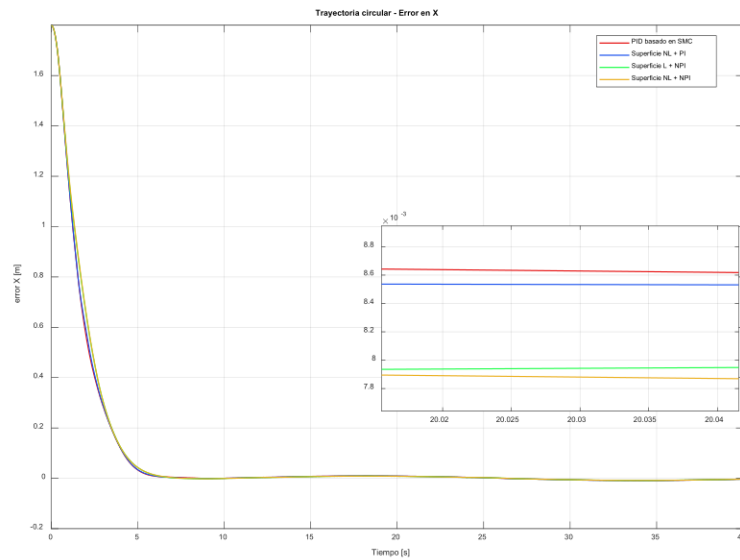


Figura 3.3. Error para la posición en X con respecto a la trayectoria circular de los controladores implementados.

En la Figura 3.2 y Figura 3.3 se tiene las respuestas de los controladores de la posición en X y del error de dicha posición respectivamente, en cuanto a la posición se visualiza que el controlador de superficie lineal más el controlador proporcional integral no lineal conjunto con el controlador de superficie no lineal más el controlador proporcional integral no lineal intentan corregir la posición en x más rápido, sin embargo los cuatro controladores logran llegar a la posición en X de referencia simultáneamente; por otro lado respecto al error, el cual debe tender a cero idealmente, en el acercamiento de la Figura 3.3 se corrobora que el controlador de superficie no lineal con PI no lineal es el controlador con menor error.

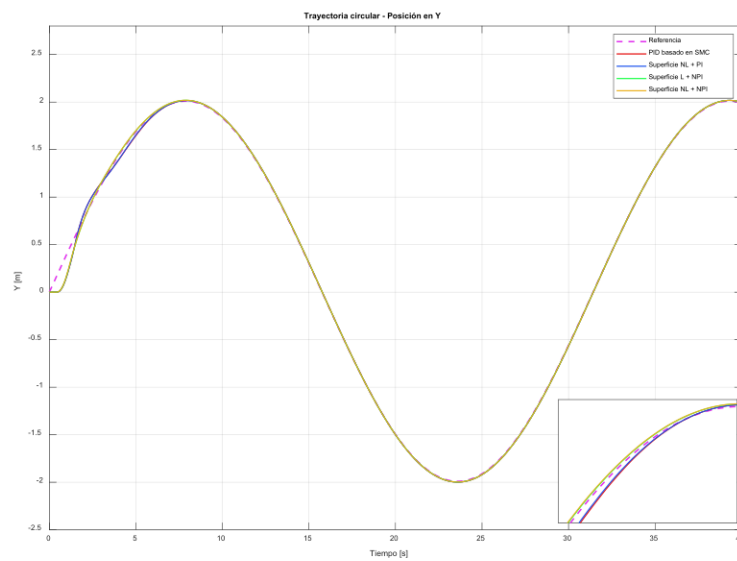


Figura 3.4. Respuesta de los controladores para la posición en Y con respecto a la trayectoria circular.

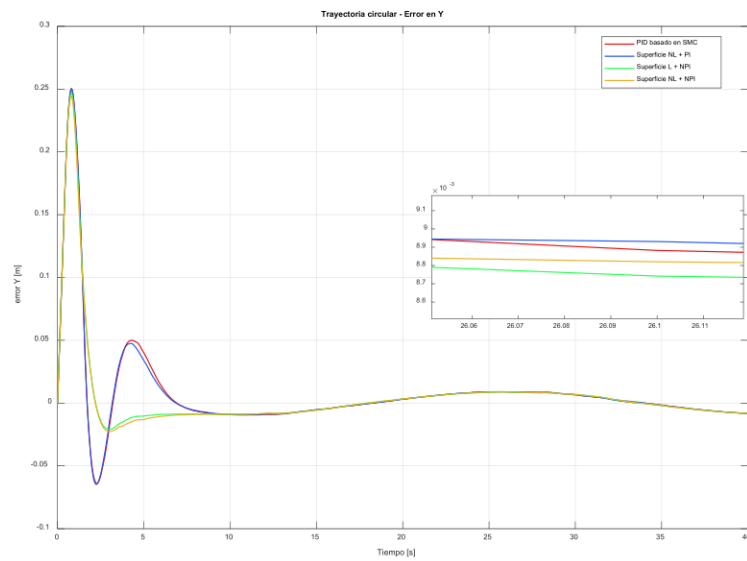


Figura 3.5. Error para la posición en Y con respecto a la trayectoria circular de los controladores implementados.

El mismo análisis que se realizó para la posición en X de la trayectoria circular se realiza para la para la posición en Y, en este caso se evidencia que claramente los controladores de superficies lineal y no lineal combinados con PI no lineales alcanzan más rápido la posición en Y, en consideración al error que de la misma manera se busca llegar a cero, el controlador que más se acerca al cero es el controlador de superficie lineal que incluye el PI no lineal.

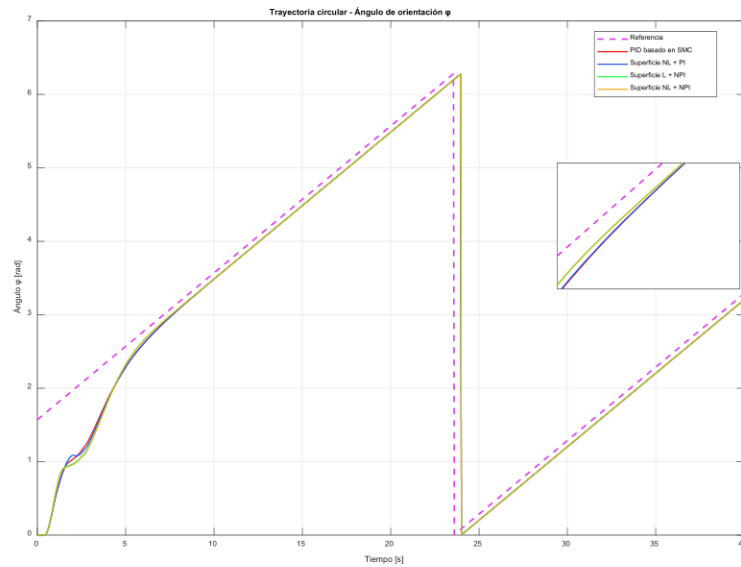


Figura 3.6. Respuesta de los controladores para el ángulo de orientación ϕ con respecto a la trayectoria circular.

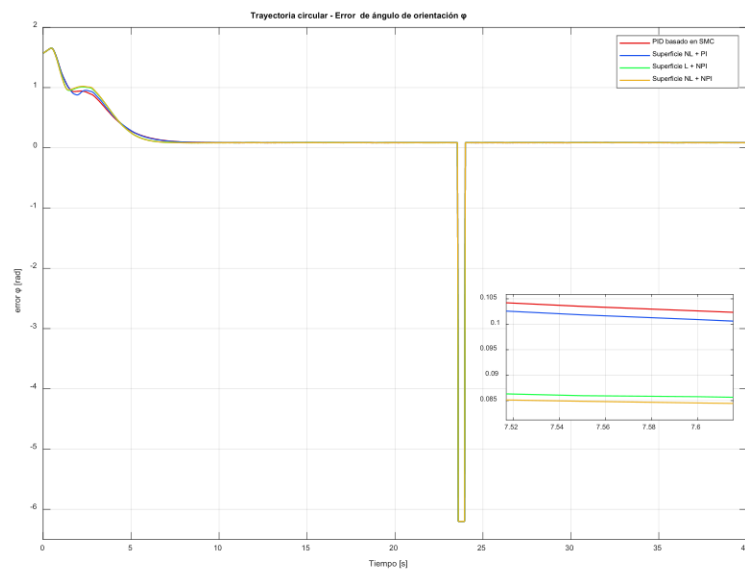


Figura 3.7. Error del ángulo de orientación ϕ con respecto a la trayectoria circular de los controladores implementados.

Si bien es cierto, para el seguimiento de trayectoria hay que tomar en cuenta la posición respecto a un punto, pero en el caso del robot móvil, también se tiene en cuenta la orientación, por tal motivo en la Figura 3.6. **Respuesta de los controladores para el ángulo de orientación ϕ con respecto a la trayectoria circular.** Figura 3.6 y Figura 3.7 se tiene tanto la posición del ángulo definido por ϕ conforme se ha detallado en el modelo cinemático del robot Pioneer 3DX en el apartado 2.1.1. Los resultados para el ángulo de

orientación de los controladores implementados muestran que existe cierto error al seguir la referencia, este error está dentro de un rango tolerable permitido, además, gráficamente se localiza que nuevamente los controles de superficie lineal y no lineal que cuentan con el PI no lineal son los que se acercan con más prontitud a la referencia y en cuanto al error el controlador de superficie no lineal con el PI no lineal es el que más se acerca a cero.

En las figuras 3.8-3.11 se tiene la velocidad lineal, el error de velocidad lineal, la velocidad angular y el error de velocidad angular en cuanto para la trayectoria circular respectivamente, se evidencia que los controladores de superficie lineal y no lineal que tienen el controlador proporcional integral no lineal son los que responden de mejor manera y llega con más rapidez a la referencia. En consideración a los errores, todos los controladores tienen valores muy similares y cercanos a cero.

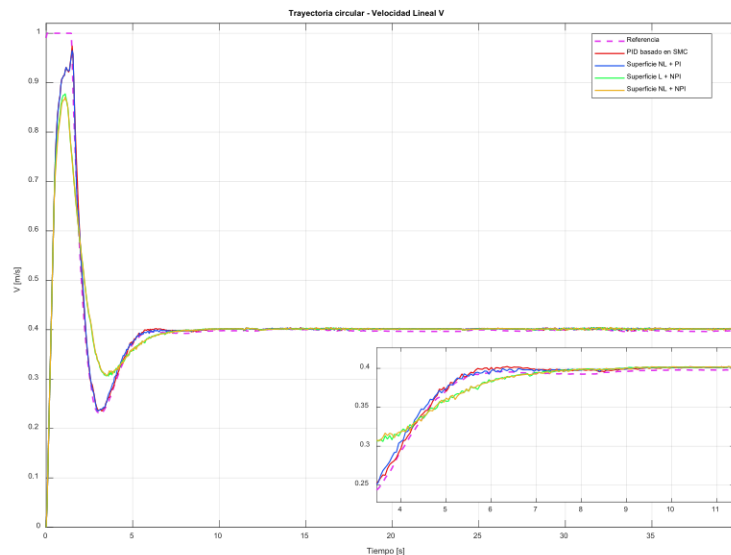


Figura 3.8. Respuesta de los controladores para la velocidad lineal con respecto a la trayectoria circular.

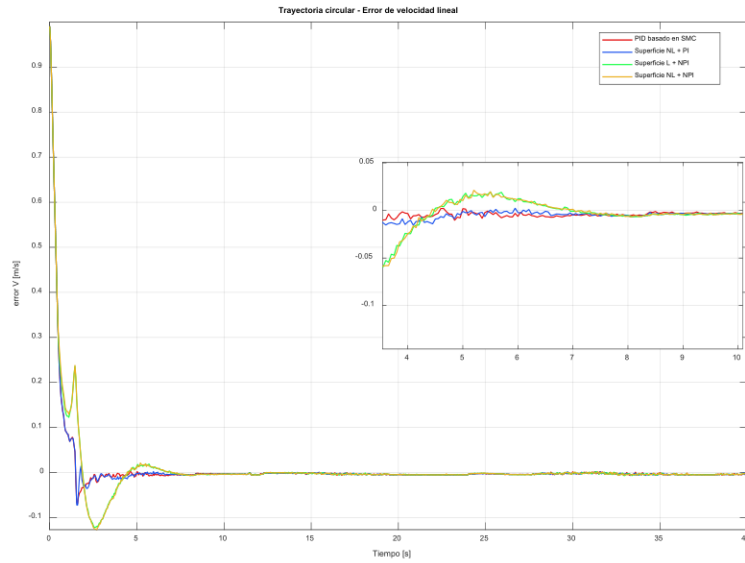


Figura 3.9. Error para la velocidad lineal con respecto a la trayectoria circular de los controladores implementados.

Como ya se ha mencionado, para que el robot Pioneer siga la trayectoria se debe controlar su velocidad tanto lineal como angular, por ello en las figuras mostradas se observa la respuesta de los controladores para la velocidad lineal que ha sido configurada para seguir una referencia de 0.4 [m/s] y de velocidad angular de 0,2 [rad/s] valores resultantes tras elegir el recorrido de la circunferencia de radio de 2 metros en 40 segundos.

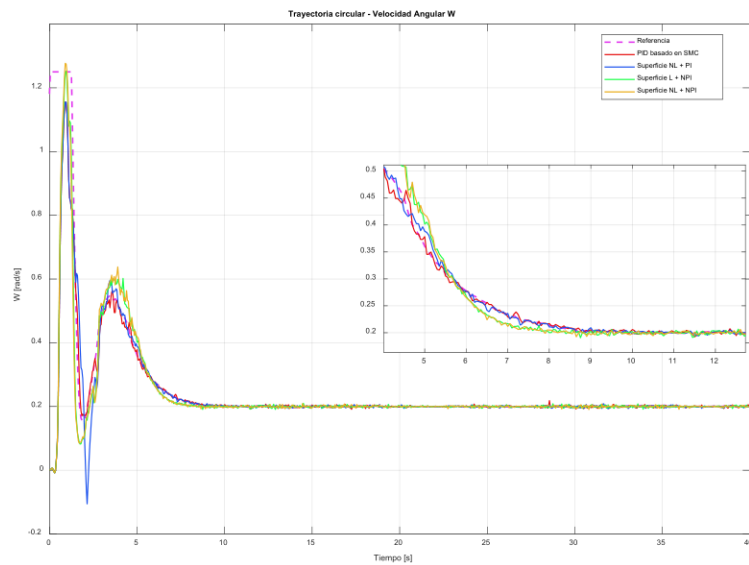


Figura 3.10. Respuesta de los controladores para la velocidad angular con respecto a la trayectoria circular.

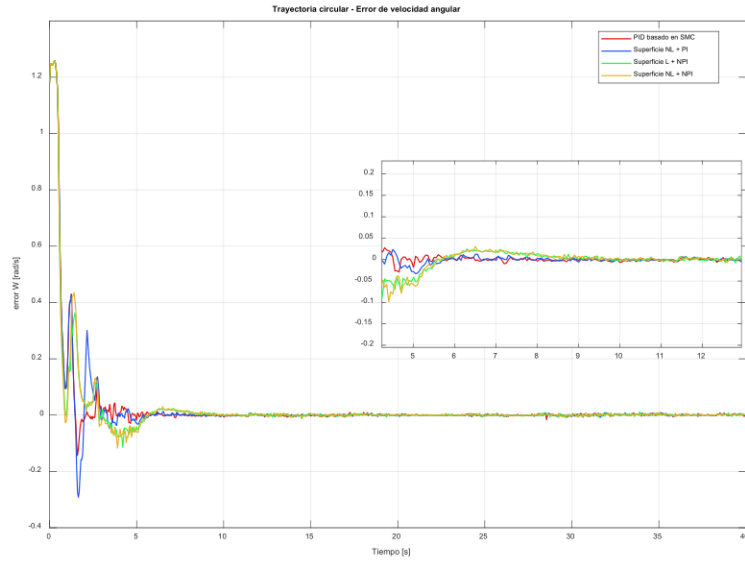


Figura 3.11. Error para la velocidad angular con respecto a la trayectoria circular de los controladores implementados.

3.3.2 PRUEBAS CON TRAYECTORIA CUADRANGULAR

El seguimiento de la trayectoria cuadrangular resulta la más compleja de realizar para cada controlador debido a los esfuerzos que debe realizar el robot en el giro de cada esquina, para estas pruebas se toma en cuenta que se debe recorrer un cuadrado de 4[m] por lado, en un tiempo de 61 segundos, los resultados son los siguientes:

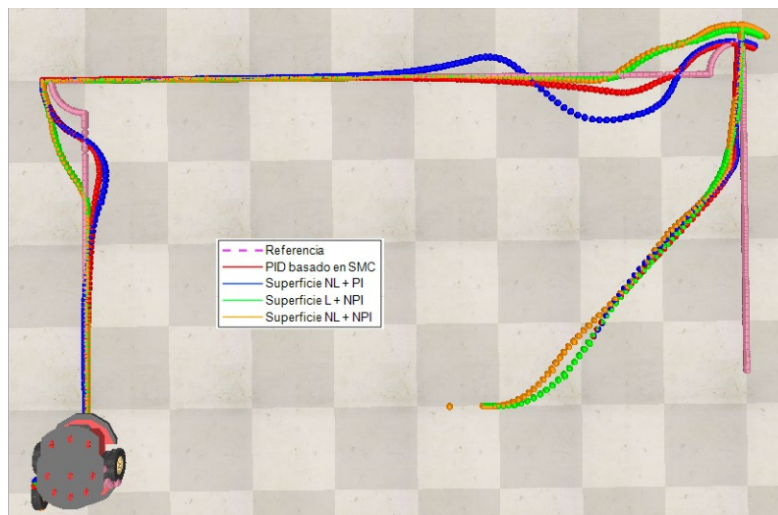
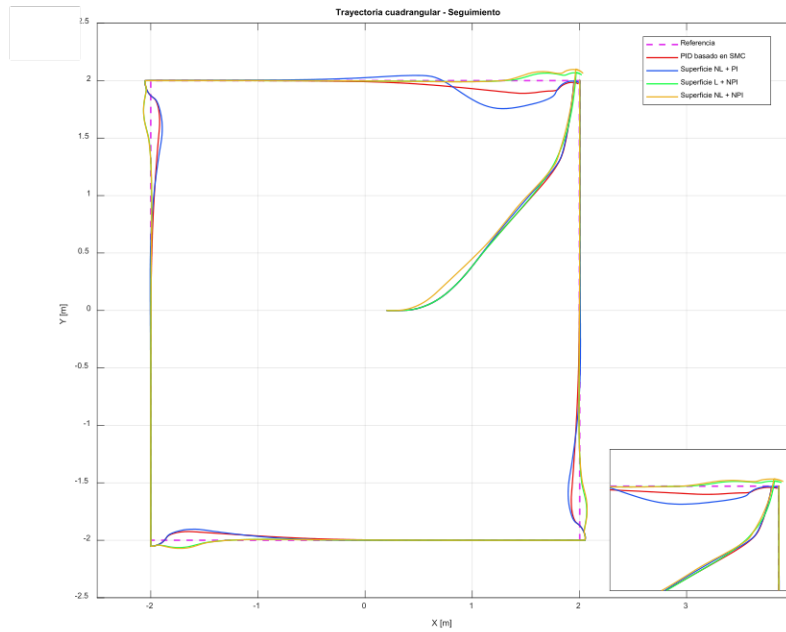


Figura 3.12. Respuesta de los controladores para el seguimiento de trayectoria cuadrangular, a) Simulink, b) CoppeliaSim.

En la Figura 3.12 se observa la respuesta de los cuatro controladores y la referencia de la trayectoria cuadrada, en el acercamiento de la parte inferior derecha se constata que los controladores que llegan más rápido a la consigna son el controlador de superficie lineal con PI no lineal y el controlador de superficie no lineal con PI no lineal, en cuanto los dos restantes toman más tiempo en estabilizarse, pero finalmente todos los controladores llegan a seguir la trayectoria.

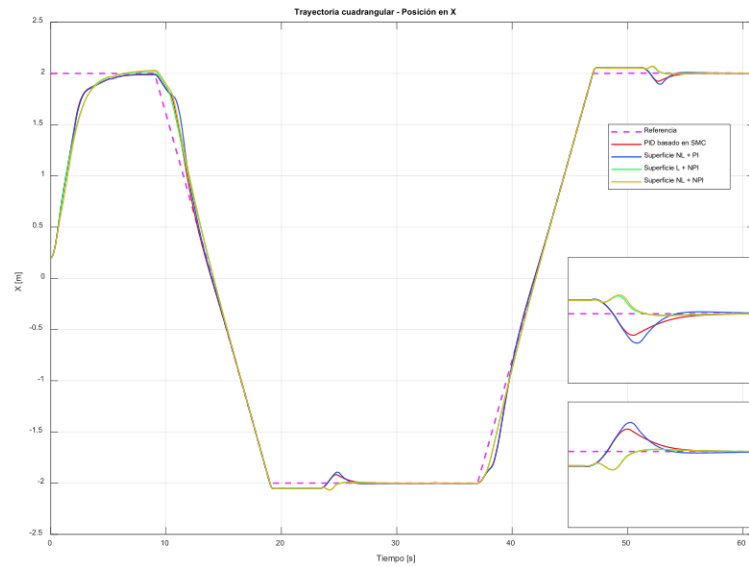


Figura 3.13. Respuesta de los controladores para la posición en X con respecto a la trayectoria cuadrangular.

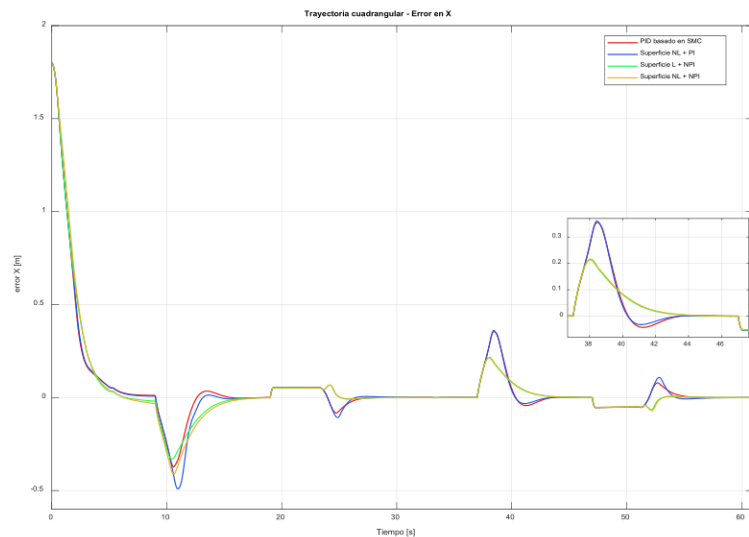


Figura 3.14. Error para la posición en X con respecto a la trayectoria cuadrangular de los controladores implementados.

Para la Figura 3.13 y Figura 3.14 al igual que en la trayectoria circular se analiza la posición en X, para dichas pruebas, los controladores de superficie lineal y no lineal con PI no lineal cada uno, son los que reaccionan más rápido corrigiendo su posición en X y de la misma manera ambos tienen los valores más cercanos a cero para el error de posición en X.

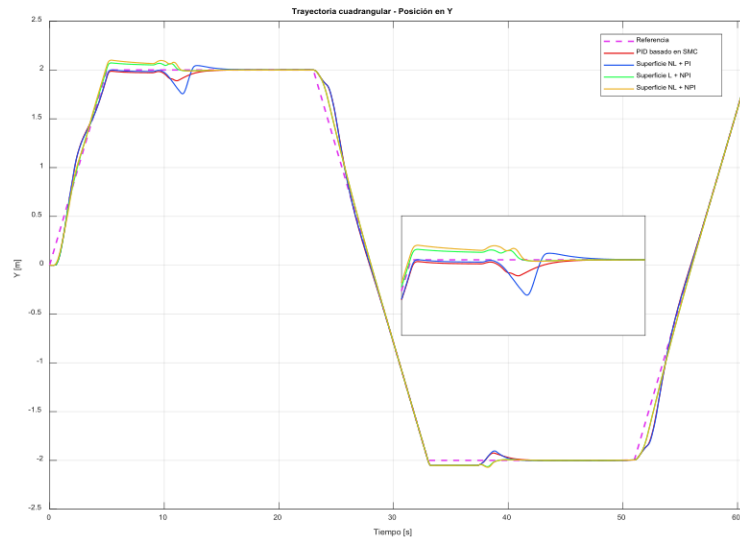


Figura 3.15. Respuesta de los controladores para la posición en Y con respecto a la trayectoria cuadrangular.

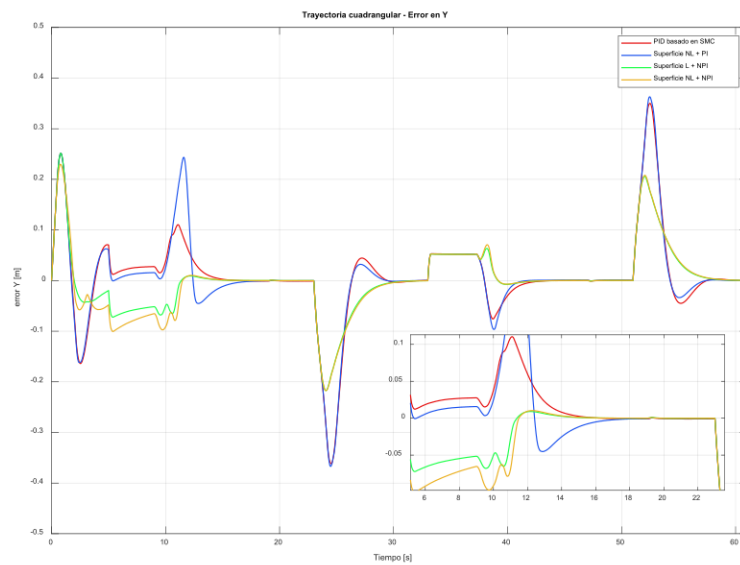


Figura 3.16. Error para la posición en Y con respecto a la trayectoria cuadrangular de los controladores implementados.

Con el análisis similar de la posición en X, se constata que para la posición en Y en la Figura 3.15 y Figura 3.16 los controladores con superficie lineal y no lineal combinados con el PI no lineal responden de mejor manera, llegando a posicionarse en el eje Y de mejor manera y en menor tiempo. En consideración a los errores de posición en Y estos son

variantes, pero los cuatro controladores cumplen su función de que este error sea lo más cercano a cero.

En los acercamientos de la Figura 3.13 de la parte derecha se observa que en los segundos 19 y 37 de los cuales se realiza un acercamiento (superior entre 16 y 22 segundos e inferior de 34 a 40 segundos) existe un error de posición constante que dura aproximadamente 4 segundos y en la Figura 3.15 se observa que existen errores constantes en los segundos 5 y 33 que tienen la misma duración se debe a que en esos instantes de tiempo, el robot virtual se detiene y no realiza un desplazamiento lineal, éste comienza a realizar un giro de 90 grados durante 4[s] a una velocidad constante, por lo que el robot real se detiene, manteniendo el error de posición con el que llegó a la esquina en donde realiza el giro y solo procede a corregir su posición cuando termina su giro de 90 grados y empieza nuevamente a avanzar de manera lineal hacia la esquina que le corresponda para seguir con la trayectoria.

En la Figura 3.17 y Figura 3.18 se muestra el ángulo de orientación en radianes, como en este caso el robot Pioneer recorre un cuadrado, éste tiene 4 ángulos de orientación, los cuales son 0, 90, 180, 270 y 360 grados representados en radianes, los cambios bruscos que se observa a partir del segundo 38 aproximadamente, es debido a que se puede interpretar el ángulo ya sea como 0 o como 360 grados o $\frac{\pi}{2}$ [rad]. Así como en los demás resultados, en este caso también se tiene que los dos controladores que incluyen el controlador proporcional integral no lineal como controlador ya sea con superficie lineal o no lineal han reaccionado mejor en el seguimiento de la trayectoria cuadrangular.

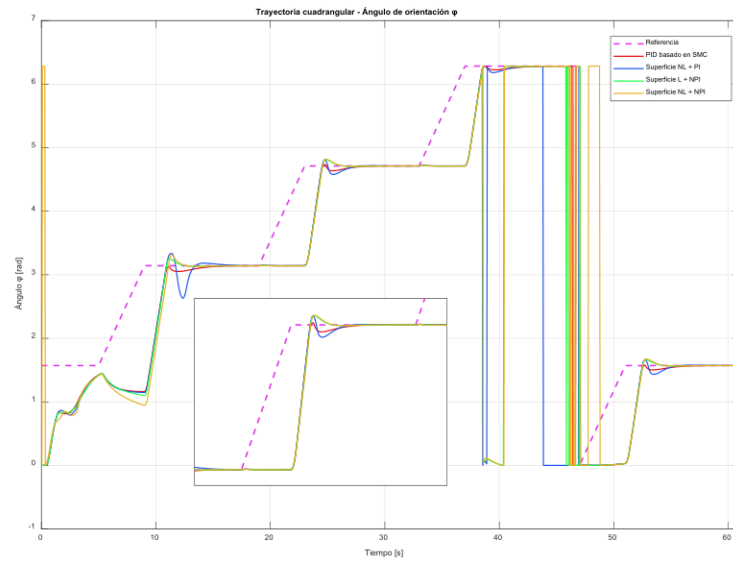


Figura 3.17. Respuesta de los controladores para el ángulo de orientación φ con respecto a la trayectoria cuadrangular.

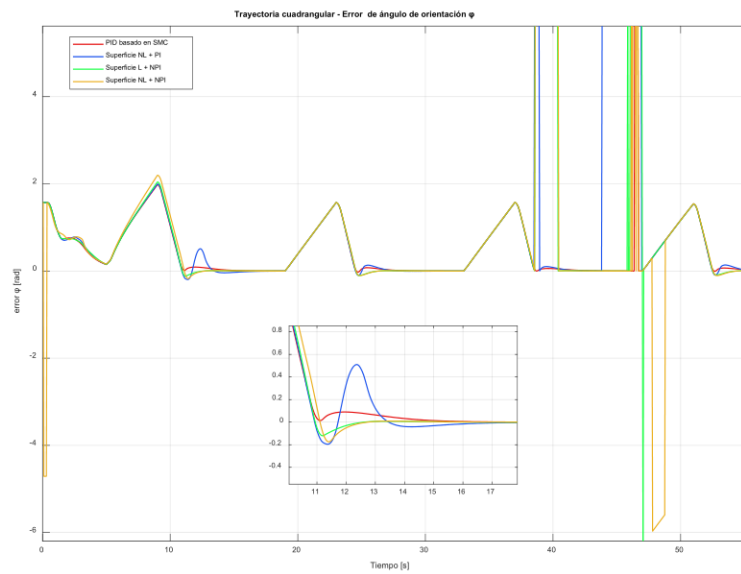


Figura 3.18. Error del ángulo de orientación φ con respecto a la trayectoria cuadrangular de los controladores implementados.

En las Figura 3.19, Figura 3.20, Figura 3.21 y Figura 3.22 se muestran las velocidades lineal y angular y sus errores de la respuesta del robot para seguir la trayectoria cuadrangular, en cuanto a la velocidad lineal se observa que los controladores que responden mejor son los controladores de superficie lineal y no lineal que cuentan con el controlador PI no lineal. De igual manera para la velocidad angular se observa que en los cuatro casos llega a su valor máximo, esto se debe a que, al momento del giro, la velocidad angular es la que realiza este trabajo de posicionar al robot en la dirección correcta.

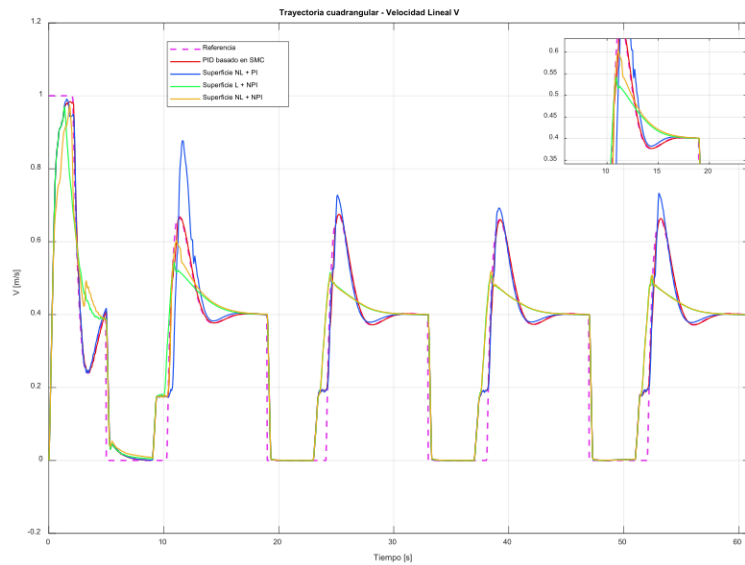


Figura 3.19. Respuesta de los controladores para la velocidad lineal con respecto a la trayectoria cuadrangular.

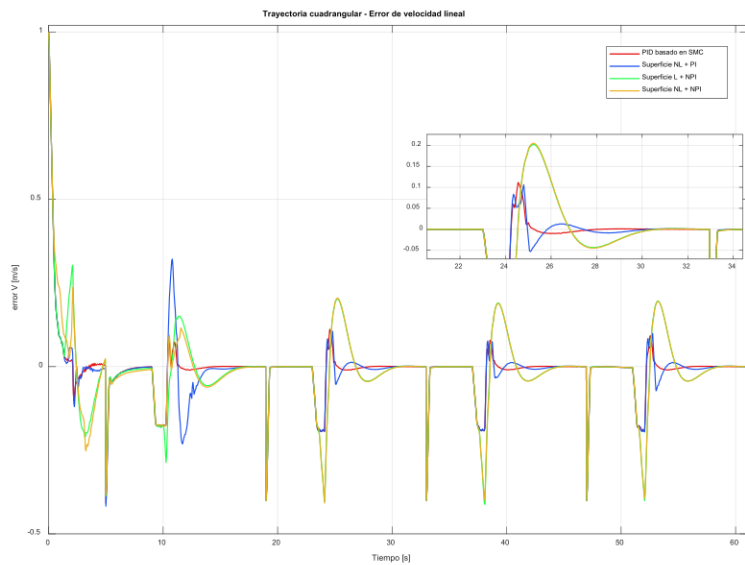


Figura 3.20. Error para la velocidad lineal con respecto a la trayectoria cuadrangular de los controladores implementados.

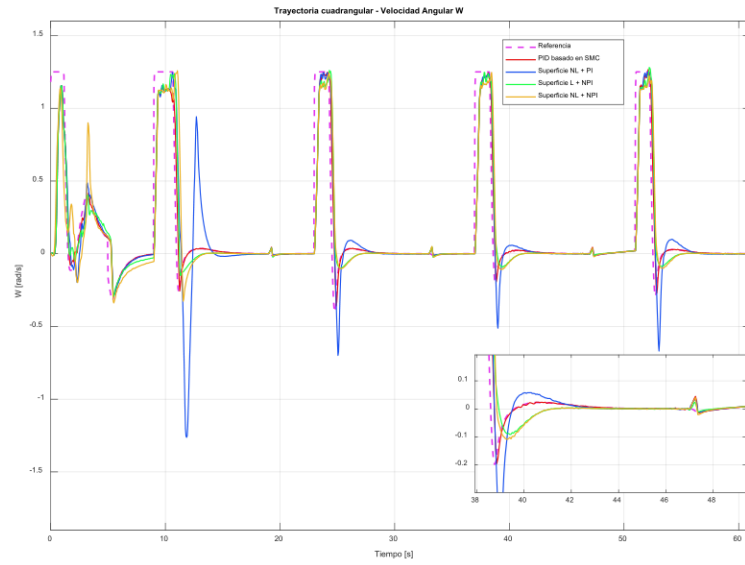


Figura 3.21. Respuesta de los controladores para la velocidad angular con respecto a la trayectoria cuadrangular.

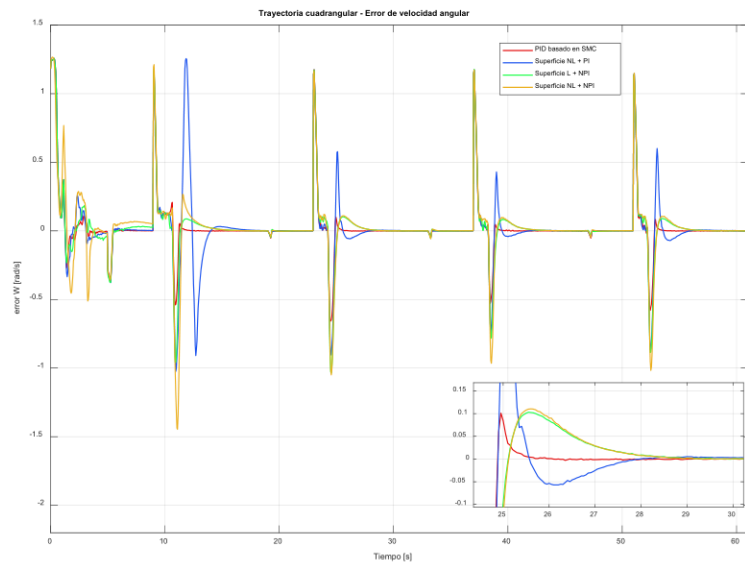


Figura 3.22. Error para la velocidad angular con respecto a la trayectoria cuadrangular de los controladores implementados.

3.4 INDICES DE DESEMPEÑO

3.4.1 ÍNDICES PARA TRAYECTORIA CIRCULAR

En base al análisis de la Figura 3.8 y Figura 3.10 se presenta la *Tabla 3.9* con los valores de los índices de desempeño de cada controlador implementado al robot Pioneer siguiendo la trayectoria circular.

Tabla 3.9 Índices de desempeño de los controladores implementados para velocidad lineal y angular en la trayectoria circular.

ÍNDICE DE DESEMPEÑO	PID BASADO EN SMC	SUPERFICIE NO LINEAL + PI	SUPERFICIE LINEAL + PI NO LINEAL	SUPERFICIE NO LINEAL + PI NO LINEAL
ISE V	0.1572	0.1527	0.1017	0.1011
Tvu V	0.1130	0.1230	0.0951	0.0968
Tiempo de establecimiento V [s]	7.05	7.3	7.5	7.65
Máximo sobreimpulso V	0.9744	0.9653	0.8775	0.8711
ISE W	1.2154	1.3343	1.1813	1.1563
Tvu W	0.1653	0.1989	0.1914	0.1935
Tiempo de establecimiento W [s]	9.2	9.15	8.95	9.05
Máximo sobreimpulso W	1.1556	1.1556	1.2522	1.2771

Para la trayectoria circular se realiza un análisis para elegir el mejor entre los cuatro controladores, se puede observar que los índices de desempeño difieren su valor mínimo para cada controlador, por lo que se debe evaluar en conjunto a los cuatro índices de desempeño. Se puede visualizar y contrastar los valores de la tabla que tanto para velocidad lineal como para velocidad angular el controlador de superficie no lineal con PI no lineal es el más indicado, no porque todos sus índices de desempeño sean menores

que los de los otros tres controladores, sino porque agrupa las mejores características de cada índice de desempeño.

3.4.2 ÍNDICES PARA TRAYECTORIA CUADRANGULAR

De la misma manera que para la trayectoria circular, en la *Tabla 3.10* se tiene los índices de desempeño para la trayectoria cuadrangular tanto para la velocidad lineal como para la velocidad angular.

Tabla 3.10 Índices de desempeño de los controladores implementados para velocidad lineal y angular en la trayectoria cuadrangular.

ÍNDICE DE DESEMPEÑO	PID BASADO EN SMC	SUPERFICIE NO LINEAL + PI	SUPERFICIE LINEAL + PI NO LINEAL	SUPERFICIE NO LINEAL + PI NO LINEAL
ISE V	0.7702	0.9246	0.2472	0.2969
Tvu V	0.4197	0.5139	0.2792	0.2854
Tiempo de establecimiento V [s]	31.65	31.3	31.1	31.05
Máximo sobreimpulso V	0.9838	0.9915	0.9706	0.9752
ISE W	2.8964	6.2061	2.7197	2.7498
Tvu W	0.8404	1.2628	0.7589	0.8449
Tiempo de establecimiento W [s]	29.95	29.7	28.55	28.5
Máximo sobreimpulso W	1.2667	1.2496	1.2810	1.2589

Asimismo, para el caso de la trayectoria cuadrangular se llega a la misma conclusión que en la trayectoria circular, dejando en evidencia que el controlador que mejores características presenta es el controlador de superficie no lineal con PI no lineal.

3.5 CONCLUSIONES

- Los esquemas de control PID basados en SMC mostrados en este documento, reemplazaron la parte discreta del controlador SMC por un esquema de control continuo de superficie, cuyo objetivo es llevar a la superficie a un valor de cero en estados estable, lo cual implica tener un error nulo, este esquema logró mitigar el efecto de chattering, la cual es una característica inherente de los controladores SMC, que hace que la señal de control resultante tenga un contenido de alta frecuencia que afecta negativamente al elemento final de control.
- Se determinó que los controladores basados en SMC propuestos por Li, Mingzhong; Wang, Fuli; Gao, Furong aplicados inicialmente a procesos químicos, funcionan acertadamente en esquemas de control para el seguimiento de trayectorias de robots móviles.
- Al comprobar el correcto funcionamiento del esquema de control PID basado en SMC, se realizaron modificaciones que incluían no linealidades en la Superficie deslizante y en el controlador de superficie, con el fin de adaptarlos a la no linealidad característica del Robot Pioneer P3DX. Y como pudo evidenciarse los mejores resultados fueron conseguidos con el esquema de control con superficie no lineal y controlador PI no lineal ya que mejoró la característica en conjunto de los índices de desempeño en comparación a los otros controladores.
- La simulación de seguimiento de trayectorias mediante los programas CoppeliaSim y Simulink/Matlab dieron como consecuencia un buen desempeño de los esquemas de control. Siendo la trayectoria circular la de mejores resultados por su simplicidad. Por otro lado, la trayectoria cuadrangular, por su naturaleza brusca exigió de mayor esfuerzo a cada controlador. A pesar de ello, los resultados evidencian un buen seguimiento de trayectoria con un sobre impulso menor a y tiempos de establecimiento menores a 32 [s].
- Los resultados mencionados fueron corroborados mediante la comparación de los índices de desempeño. Los cuales indicaron que la inclusión de no linealidades ayudaba al desempeño del sistema. En todos los casos, las señales de control no sobrepasaron los límites físicos y mecánicos del robot móvil.

- La interfaz gráfica desarrollada fue de mucha utilidad para la interacción del usuario con los programas mencionados. Con la cual se evidencia todos los parámetros relacionados al estudio del seguimiento de trayectorias.

3.6 RECOMENDACIONES

- Al tratar de regular sistemas no lineales es recomendable utilizar controladores robustos que también incluyan no linealidades para que se adapten a los diferentes puntos de operación de los procesos. Como es el caso de los controladores PID basados en modos deslizantes. Además de investigar más funciones que incluyan no linealidades que no se limiten al método de Han.
- Se puede ampliar el conocimiento de controladores basados en SMC reemplazando los controladores de superficie de tipo PID por otros como lógica difusa, control predictivo, redes neuronales, entre otros. Y aplicarlos a otras ramas de la robótica incorporando tareas más complejas como la evasión de obstáculos.
- Investigar métodos matemáticos de sintonización de los parámetros del controlador de superficie que tengan en cuenta la dinámica de la planta, así como de los parámetros de las funciones no lineales.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Solaque, M. Molina y E. Rodríguez, «SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS CON UN ROBOT MÓVIL DE CONFIGURACIÓN DIFERENCIAL,» *Ing. USBMed*, vol. 5, nº 1, 2014.
- [2] V. Barrientos, J. García y R. Silva, «Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte,» *Polibits*, nº 35, pp. 12-17, 2007.
- [3] G. Andaluz, «Modelación, Identificación y Control de Robots,» Quito, 2011.
- [4] O. Camacho y C. Smith, «Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes,» ELSEVIER, Mérida, 2000.
- [5] M. Li, F. Wang y F. Gao, «PID-Based Slidong Mode Controller for Nonlinear Processes,» *American Chemical Society*, vol. 40, pp. 2660-2667, 2001.
- [6] G. Zaidner, S. Korotkin, E. Shteimberg, A. Ellenbogen, M. Arad y Y. Cohen, «Control, Non Linear PID and its application in Process,» *Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 2010.
- [7] MathWorks, «Simulink,» 2022. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>. [Último acceso: 11 02 2022].
- [8] Coppelia Robotics, «CoppeliaSim from the creators of V-REP,» 2022. [En línea]. Available: <https://coppeliarobotics.com>. [Último acceso: 11 02 2022].
- [9] C. Albornoz , M. Berón y G. Montejano, «Interfaz Gráfica de Usuario: el Usuario como Protagonista del Diseño».
- [10] MathWorks, «MathWorks Inc,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/matlab/app-designer.html>. [Último acceso: 15 Diciembre 2021].

5 ANEXOS

ANEXO I

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Para visualizar de mejor manera los controladores propuestos e implementados en el presente trabajo, se ha desarrollado una interfaz gráfica, con la finalidad de que se facilite la observación y comparación de los controladores, tanto en trayectorias, posiciones, orientación, velocidad linear y angular como en los índices de desempeño para cada caso. El desarrollo de esta se lo ha realizado en MATLAB, no obstante, cabe mencionar que se usa tanto MATLAB-Simulink como CoppeliaSim, siendo este último el que simula el robot Pioneer como el sistema de robótica móvil.

Para interactuar como usuario con la interfaz gráfica desarrollada, lo primero que se debe realizar es acceder a la carpeta appTesis y se procede a abrir el archivo realizado en CoppeliaSim llamado prueba_vrepmatlab y la app de Matlab con nombre appTesis.mlapp. Como ventana de presentación se tiene la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 5.1.



Figura 5.1. Presentación de Interfaz Gráfica.

Para el uso de la aplicación se indica que se tiene un menú superior por el cual se puede navegar, en la opción Seguimiento de trayectorias mostrado en la Figura 5.2, se tiene un menú de selección en la parte izquierda en donde el usuario elige uno de los controladores y el trayecto que se desea seguir con dicho controlador. Una vez elegido controlador y trayectoria se procede a presionar el botón Simular, el cual inicia la conexión del controlador con CoppeliaSim, el indicador de luz proporciona la información de que se está ejecutando la simulación cuando está en verde y en azul cuando ha culminado o no se ha ejecutado nada; al finalizar la simulación se grafica la referencia y la respuesta del controlador ante la trayectoria antes configurada.

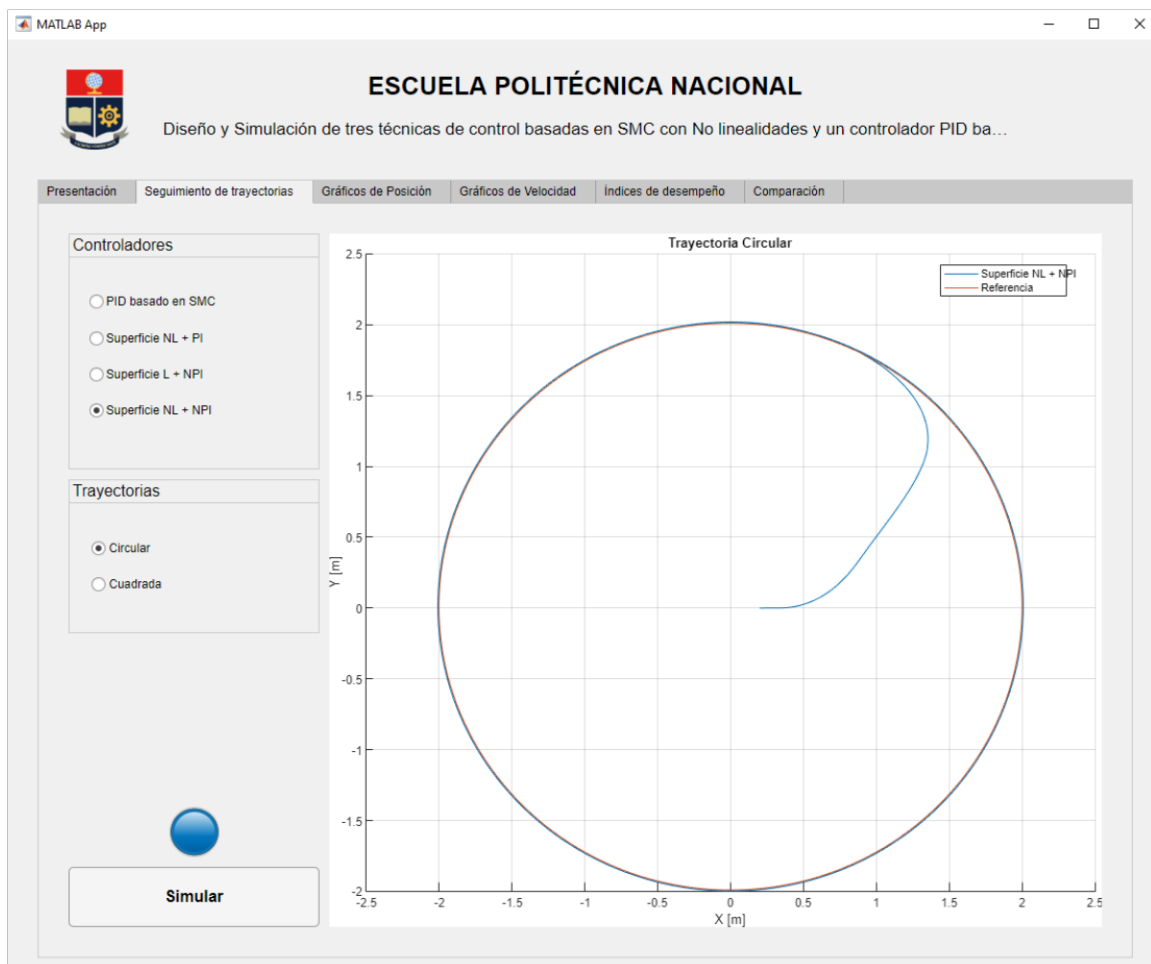


Figura 5.2. Pestaña de Seguimiento de trayectorias e la interfaz gráfica.

Al continuar navegando el menú, se encuentra la pestaña de Gráficos de Posición, en ella se muestra la posición en X, Y, y el ángulo de orientación, cada uno con sus respectivos errores que se visualiza en la Figura 5.3.

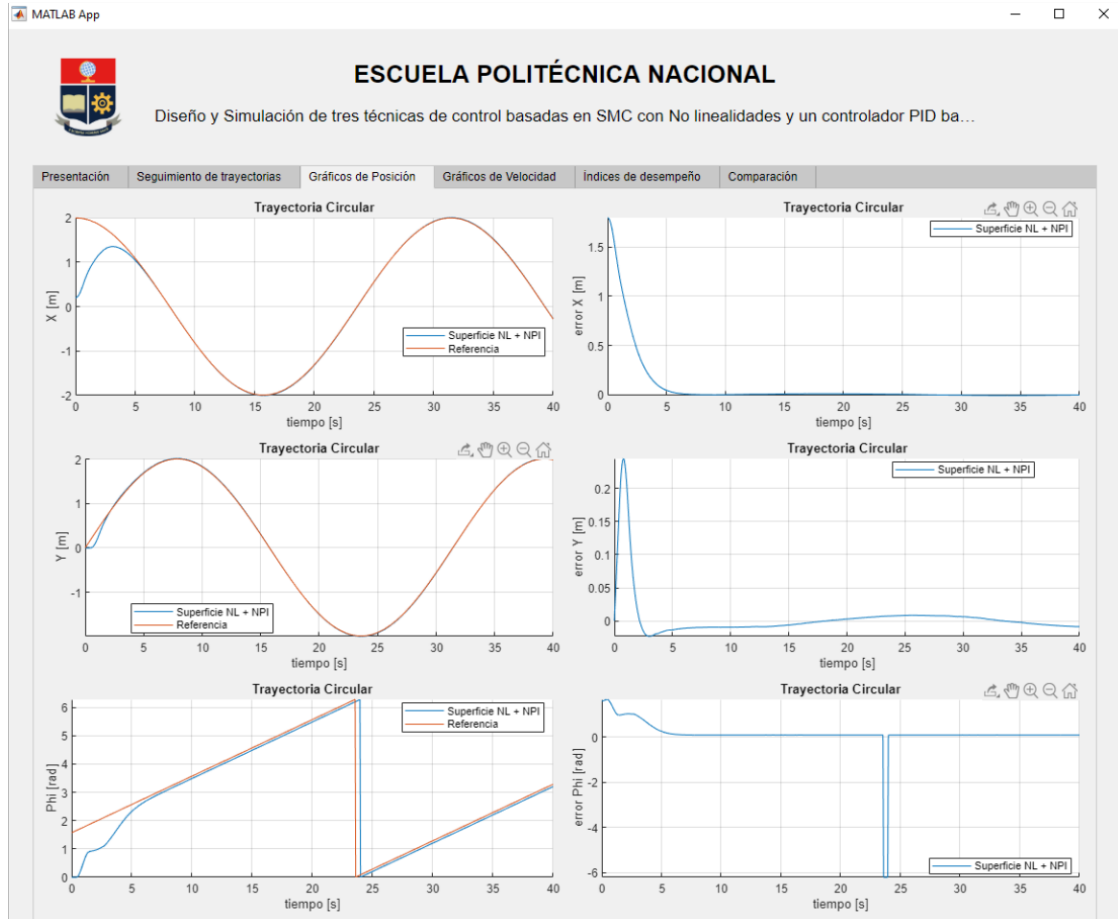


Figura 5.3. Pestaña de Gráficos de Posición de la Interfaz Gráfica.

De la misma manera se tiene para las dos pestañas siguientes llamadas Gráficos de Velocidad e índices de desempeño, mostrando gráficamente el desempeño del controlador en cuanto a velocidad lineal y angular con sus errores y con respecto a los índices de desempeño se muestra el ISE, T_{vu} , tiempo de establecimiento y máximo sobreimpulso del controlador simulado como hace referencia la Figura 5.4 y Figura 5.5

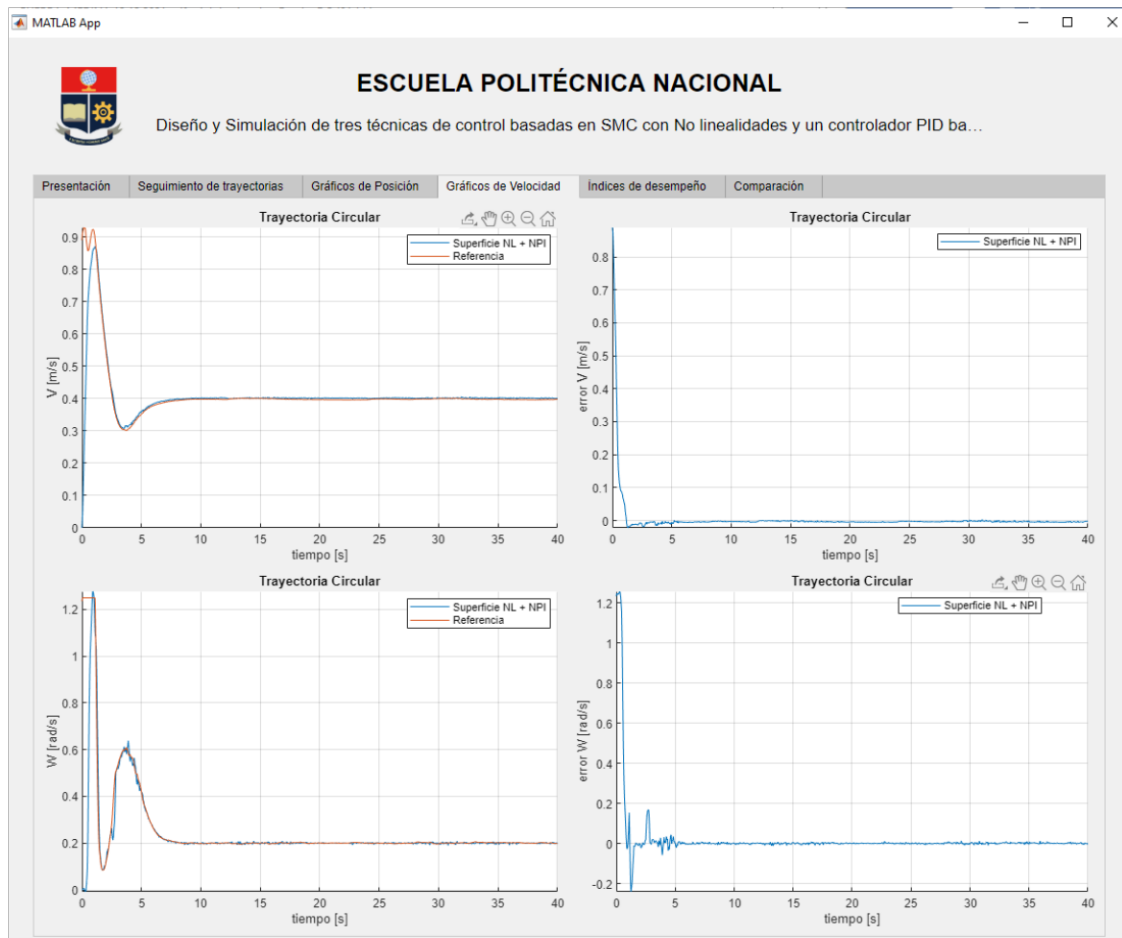


Figura 5.4. Pestaña de gráficos de velocidad de Interfaz Gráfica.

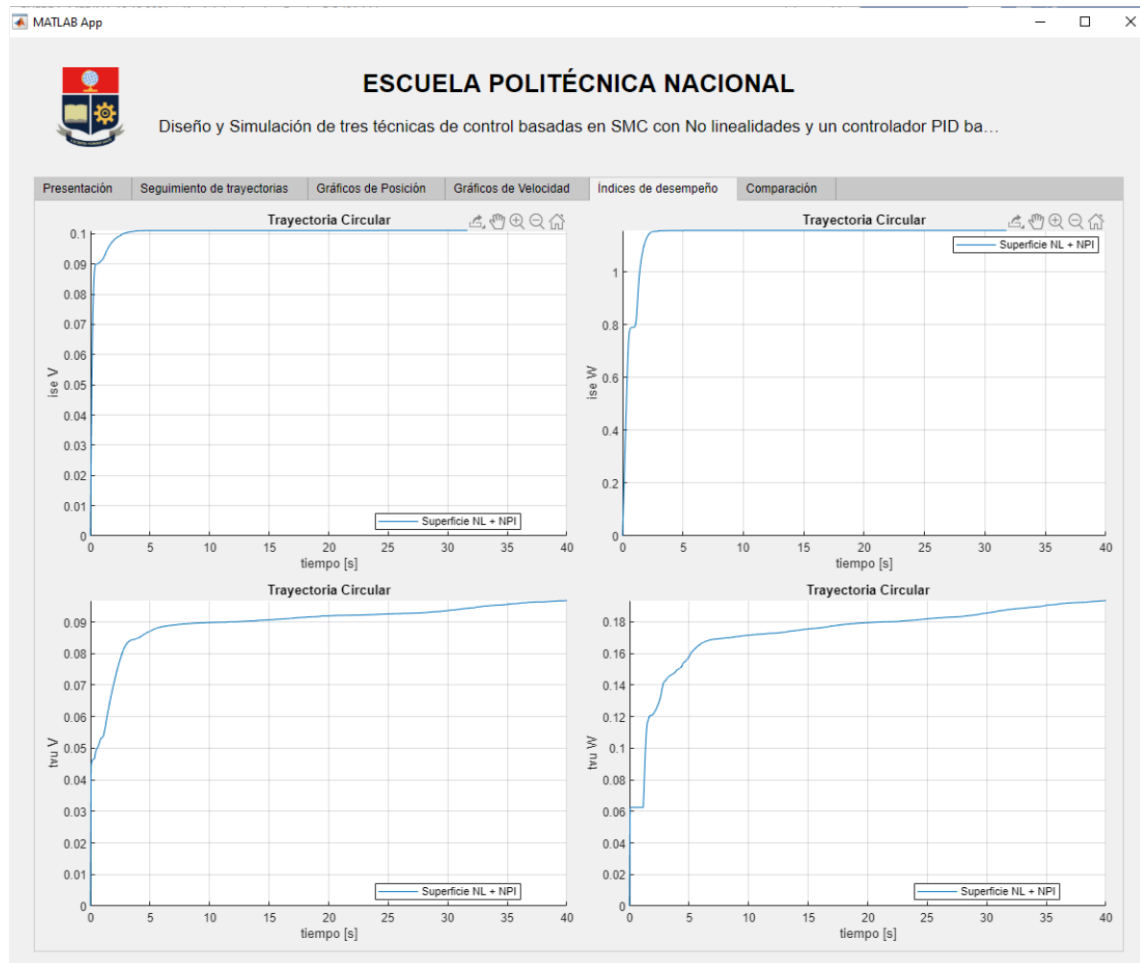


Figura 5.5. Pestaña de Índices de desempeño de la Interfaz Gráfica.

En la última pestaña llamada Comparación, la cual es similar a la segunda pestaña, dispone de un menú de selección múltiple en el cual se habilita las posibilidades de elegir ya sea uno o los cuatro controladores y comparar cualquiera de los parámetros ya sea trayectoria, posiciones, errores, velocidades o índices de desempeño en respuesta a la trayectoria circular o cuadrada dependiendo de las necesidades del usuario.

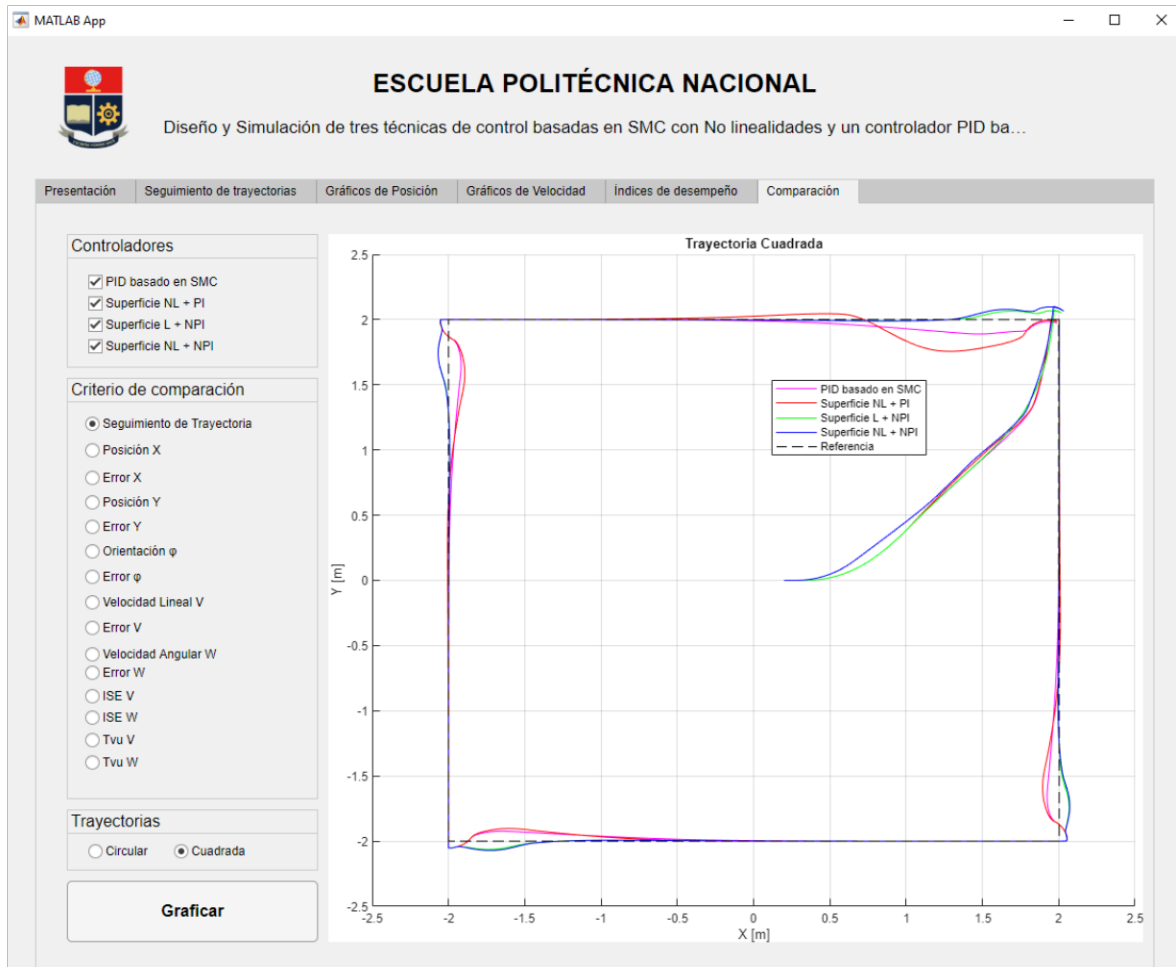


Figura 5.6. Pestaña de Comparación de la Interfaz Gráfica.