

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 1

**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.

daniilo.chavez@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Cristian Alexander Bonilla Lema 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.



Cristian Alexander Bonilla Lema

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Cristian Alexander Bonilla Lema, 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.

AGRADECIMIENTO

“Gracias, de corazón a los de verdad gracias, en realidad a todos los que al final en algo han aportado a lo largo de este camino dulce sin embargo amargo. No vamos a defraudarlos, no, bien por apoyarnos, gracias de caballero. Siempre faltarán palabras para agradecer a la gente que más quiero.”

Cristian.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 SISTEMA DE CONTROL	3
1.4.2 MÉTODOS DE APROXIMACIÓN	6
1.4.2.1 Aproximación a un sistema de primer orden más retardo	6
1.4.3 ROBÓTICA MÓVIL.....	8
1.4.4 ROBOT MÓVIL UNICICLO	8
1.4.5 CONTROLADORES.....	10
1.4.5.1 Controlador PID	11
1.4.5.2 Controlador PID no lineal propuesto por Han	13
1.4.5.3 CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES (SMC).....	15
1.4.5.4 Controlador PID basado en SMC	18
1.4.6 ÍNDICES DE DESEMPEÑO	19
1.4.6.1 Integral del cuadrado del error.....	19
1.4.6.2 Índice de variación total	19
1.4.6.3 Máximo sobre impulso	20
1.4.6.4 Tiempo de establecimiento	20
2 METODOLOGÍA.....	21

2.1 Robot Pioneer 3DX	21
2.1.1 Modelo cinemático del robot Pioneer 3DX	22
2.1.2 Modelo aproximado del robot Pioneer 3DX.....	24
2.1.2.1 Velocidad lineal.....	25
2.1.2.2 Velocidad angular	26
2.2 Generación de trayectorias	27
2.2.1 generación de Trayectoria circular	28
2.2.2 generación de trayectoria cuadrangular	29
2.3 ESQUEMA DE CONTROL.....	30
2.4 Diseño de controladores	31
2.4.1 controlador de posición	32
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
5 anexos.....	35

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 softwares 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.

1 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.

1.1 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

1.2 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 Tvu.

1.3 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 softwares 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, Tvu, tiempo de establecimiento y máximo sobre impulso.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 SISTEMA DE CONTROL

El avance tecnológico y de la industria son el resultado del estudio y aplicación de los sistemas automatizados. La teoría de control es aplicada en diferentes procesos para la regulación de magnitudes como: temperatura, presión, nivel, flujo, voltaje, corriente, en la robótica y más. El objetivo en cada campo es el de optimizar y mejorar la eficiencia de los procesos, haciéndolos trabajar dentro de rangos de operación que reduzcan el consumo energético, que simplifiquen el trabajo de ciertas operaciones, y a su vez cumplan con los requerimientos o parámetros de funcionamiento. Es por esta razón que la teoría de control abarca varias áreas de la ingeniería, integrando los sistemas de comunicación, sistemas mecánicos, hidráulicos, sistemas micro procesados, sistemas eléctricos etc. En la actualidad, el extenso estudio de los sistemas de control permite regular la dinámica de sistemas lineales, no lineales, sistemas de una entrada y una salida (SISO), sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), y la combinación de ellos [6].

Un sistema de control, por definición, es el conjunto de elementos que funcionan de manera enlazada para orientar a un proceso a funcionar dentro de parámetros establecidos para obtener una respuesta deseada, estable en el tiempo y resistente ante perturbaciones [7].

Los componentes de un sistema de control se resumen en los siguientes [8]:

- Sensor: es el elemento encargado de medir la variable controlada, la cual es el parámetro que se desean regular dentro de un proceso para llevarla a un valor de referencia.
- Actuador: o el elemento final de control, es el responsable de alterar directamente la variable manipulada. El actuador obedece a las señales de control producidas por el controlador.
- Controlador: es la parte principal de un sistema de control, se encarga de calcular las decisiones de control que debe realizar el actuador para tener una respuesta deseada con un error lo más cercano a cero.
- Proceso: comprende toda la dinámica del sistema a controlar.

Los tipos de sistemas de control son los de lazo abierto y lazo cerrado. La estrategia a lazo abierto se caracteriza por la ausencia de realimentación de la señal de salida, actualmente no se la considera como un sistema de regulación al no ejercer decisiones de control en función del error de la variable controlada. Los componentes son el controlador, actuador y el proceso como se observa en Figura 1.

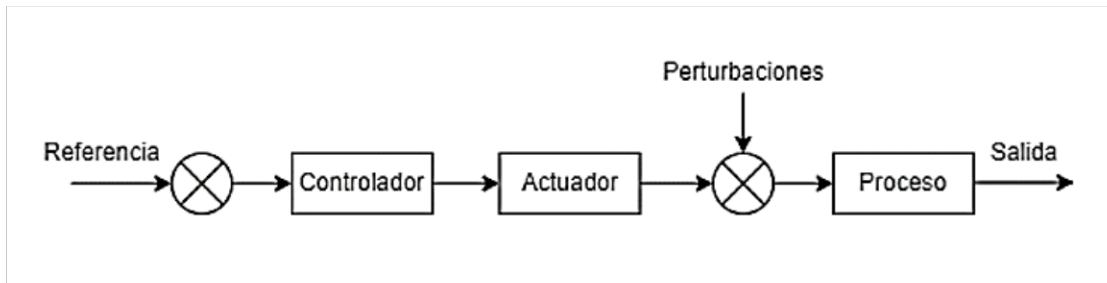


Figura 1.1. Elementos de un sistema de control a lazo abierto

El sistema de control a lazo cerrado de la Figura 1.2 presenta una realimentación de la variable controlada. Esta es comparada con la señal de referencia, el error presente en la variable es ingresado al controlador para la obtención de una señal de control que disminuya el error a cero. Los sistemas de control realimentados son los más utilizados en la industria puesto que aseguran tener un buen seguimiento de referencias y el rechazo ante perturbaciones.

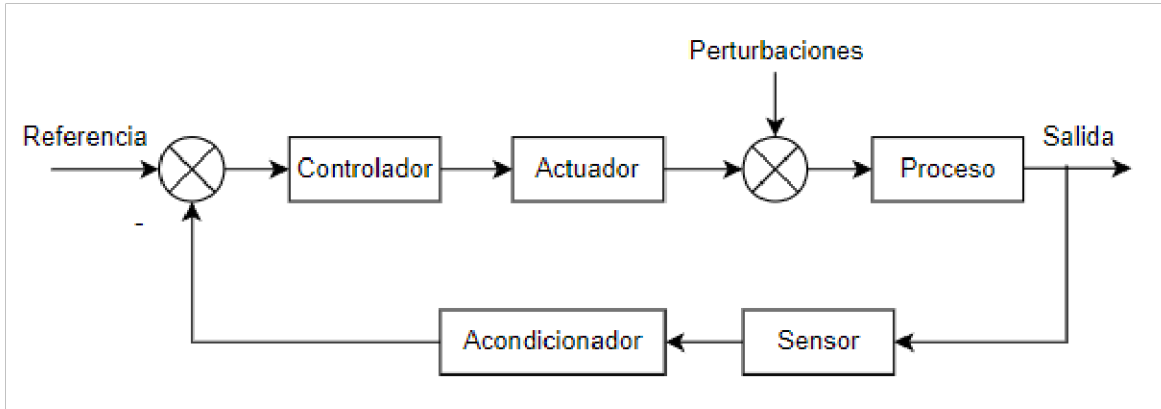


Figura 1.2. Sistema de control a lazo cerrado

El diagrama equivalente de un sistema a lazo cerrado se muestra en la Figura 1.3. Donde $G(s)$ es la función de transferencia de la planta, controlador y actuador, $H(s)$ es la función de transferencia del sensor más el acondicionador.

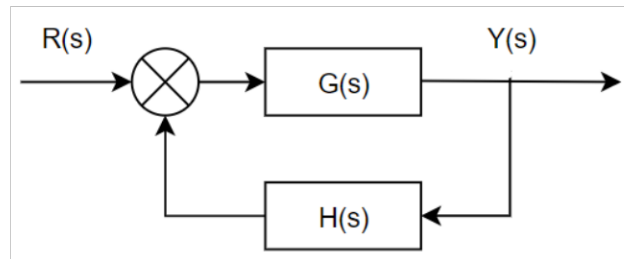


Figura 1.3. Diagrama equivalente de un sistema a lazo cerrado

Al simplificar y obtener la función equivalente del sistema se obtiene la ecuación (1.1):

$$F(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)} \quad (1.1)$$

La realimentación modifica los polos del sistema, de tal manera que el denominador es igual a $1 + HG$. Este cambio altera la respuesta del sistema en estado transitorio como en estado permanente, de la misma manera afecta la estabilidad del sistema. Por lo que dependiendo de los valores que tome el controlador y la función de transferencia de la realimentación, el sistema puede mejorar o empeorar su respuesta.

1.4.2 MÉTODOS DE APROXIMACIÓN

La teoría de control requiere de modelos matemáticos que relacionen las entradas, salidas y variables internas de un proceso para el diseño de controladores. La mayoría de las plantas a controlar que se encuentran en la industria son descritas por ecuaciones de alta complejidad que incluyen no linealidades o un alto número de variables involucradas, por lo que el control se vuelve más complejo. De esto nace la necesidad de simplificar los modelos que a su vez faciliten el diseño de reguladores.

1.4.2.1 Aproximación a un sistema de primer orden más retardo

El modelado simplifica la dinámica del proceso a una función de transferencia de primer orden más retardo como se muestra a continuación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1.2)$$

Donde

$Y(s)$: salida del sistema

$U(s)$: señal de control que ingresa al sistema

K : ganancia del sistema en estado estable

θ : constante de tiempo de retardo del sistema

τ : constante de tiempo del sistema

Para obtener la función de transferencia se proponen diferentes métodos de cálculo, el usado en este documento corresponde al método de dos puntos propuesto por Smith [9]. Para lo cual se debe obtener la curva de reacción de la salida ante una entrada paso en la señal de control como se observa en la Figura 1.4.

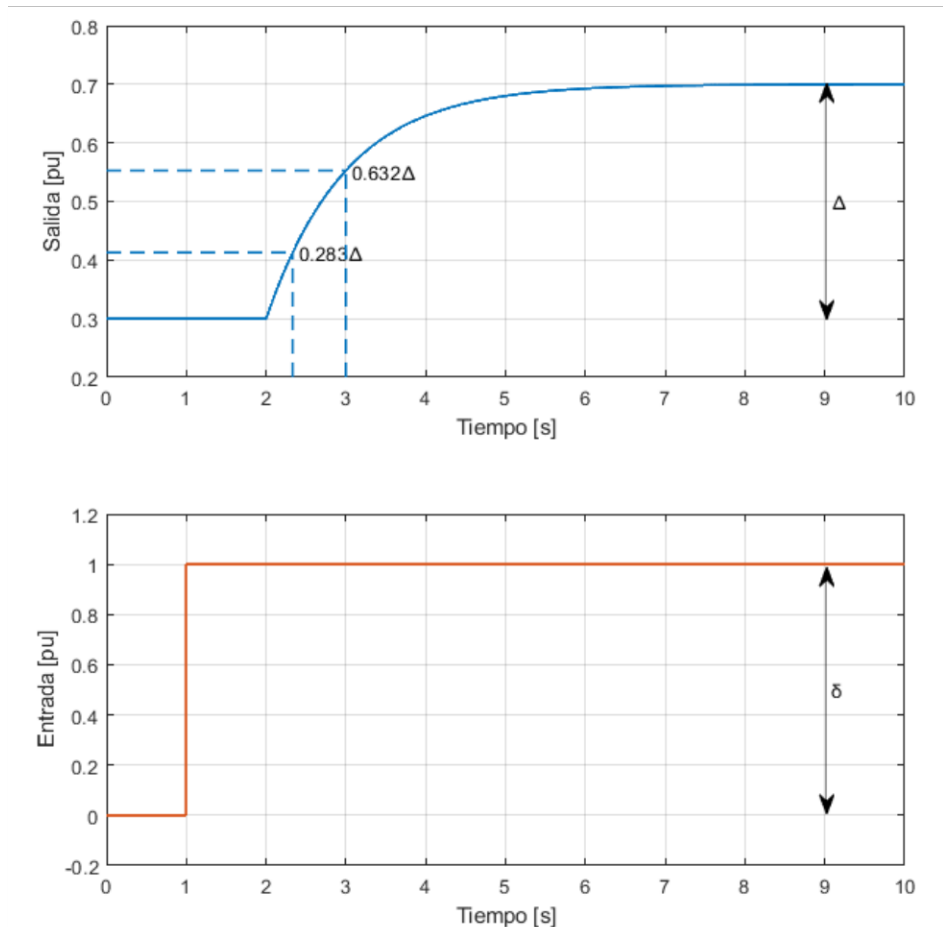


Figura 1.4. Curva de reacción de la salida del sistema ante una entrada paso

Se realizan las siguientes mediciones:

Δ : Variación de la salida

δ : Variación de la entrada

$t_{63.2\%}$: tiempo en el que ocurre el valor 0.632Δ

$t_{28.3\%}$: tiempo en el que ocurre el valor 0.283Δ

Los valores de la función de transferencia se calculan según las siguientes ecuaciones [9]:

$$K = \frac{\Delta}{\delta} \quad (1.3)$$

$$\tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) \quad (1.4)$$

$$\theta = t_{63.2\%} - \tau \quad (1.5)$$

1.4.3 ROBÓTICA MÓVIL

La robótica se concibe como una rama de la ciencia en la que áreas como la mecánica, eléctrica, electrónica, informática, la ingeniería como tal, entre otros campos, se combinan con el objeto de crear mecanismos, máquinas o dispositivos con cierta autosuficiencia e inteligencia, los cuales están destinados a cumplir algunas tareas en lugares determinados, imitando el comportamiento de un ser humano o de un animal, los cuales intentan suplantar y cumplir la labor de estos últimos. [3]

Como se menciona anteriormente, la robótica abarca varias áreas y van acoplándose progresivamente más a su rama, por lo que su estudio y aplicación ha ido avanzando a lo largo de la historia, dichos avances han aportado para crear y diseñar sistemas que dan solución a problemas, automatizan y hacen más efectivos y seguros ciertos trabajos, y con ello se logra innovar en el campo industrial, comercial y de investigación. Conforme las capacidades, tareas y aplicación que cumplen los robots que se han diseñado, mantienen una clasificación de: manipuladores, estáticos, humanoides, tele operados, móviles y varias subclasificaciones dependiendo del enfoque que se les dé a estos. [10]

Con respecto a la robótica móvil, hace referencia a los robots que tienen mediante su estructura y cierto grado de inteligencia la facultad de desplazarse respecto a un entorno, ya sea este aéreo, marítimo o terrestre. En el caso de los aéreos, se tiene los robots con hélices rotativas y por otro lado los de alas fijas, en lo que respecta a los marítimos se subdividen por la forma en la que navegan, ya sea debajo del medio acuático a los que se les denomina submarinos o por el contrario por encima, llamados robots flotantes; por último, en el caso terrestres se cuenta con robots móviles con patas, con cadenas y con ruedas. Es preciso mencionar que los robots móviles, a diferencia de los demás han sido diseñados para estar trasladándose, por lo que está variando de manera permanente la posición y orientación en relación con el sistema al que esta referenciado [3] [11].

1.4.4 ROBOT MÓVIL UNICICLO

Dentro de la clasificación de robots móviles terrestres se tiene los que poseen ruedas, en el presente caso se trata el robot móvil unicycle también llamado de tracción diferencial, gracias a su estructura simple al contar con dos ruedas con un eje común pero cada una comandada de manera independiente y que además para su estabilidad cuenta con una rueda loca como se observa en la Figura 1.5, por lo tanto, se tiene de manera similar su cinemática simple y como ventaja su movilidad y alta tracción o dirección dada por la

simplicidad de la configuración de sus ruedas, esto lleva a tener aisladamente el control de velocidad lineal por un lado y de velocidad angular por otro. Asimismo, la aproximación que conlleva su modelo matemático se relaciona con la aproximación de los robots de cuatro ruedas que sin duda ocupan gran parte en el campo industrial, razón por la cual este robot sigue siendo una buena selección para el estudio, investigación y aplicación de distintos controladores que se siguen desarrollando. No obstante, este robot presenta una restricción de movilidad para desplazarse directamente a los lados también conocida como restricción no holonómica [11] [12].

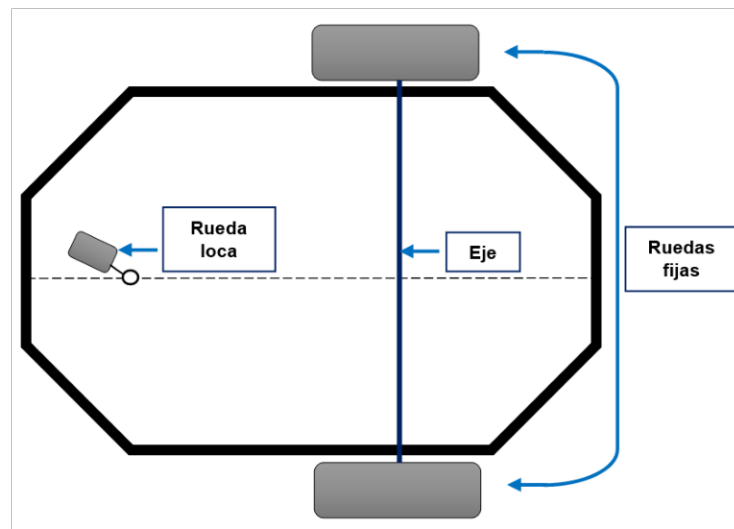


Figura 1.5. Representación de un robot móvil unicyclo [12].

La restricción no holonómica se aprecia de mejor manera en la Figura 6. Donde los desplazamientos posibles son aquellos en donde el robot puede dirigirse mediante el movimiento libre hacia adelante o atrás de sus ruedas. Mientras que para los desplazamientos laterales, el robot no puede moverse directamente o en paralelo, en cambio, primero debe hacer un giro moviendo sus ruedas hacia atrás o hacia adelante para corregir su orientación y luego desplazarse libremente [12].

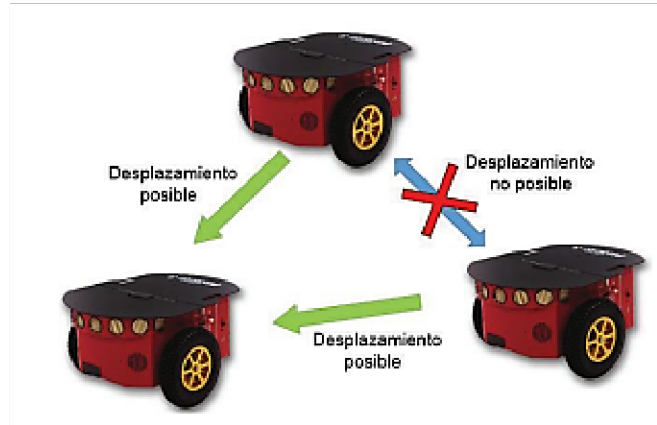


Figura 1.6. Representación gráfica de la restricción no holonómica [12]

1.4.5 CONTROLADORES

Durante los primeros pasos de la industria, el ser humano fue el encargado de regular los procesos industriales. Los operadores tenían la función de decidir cómo y cuándo manipular las variables de un proceso para obtener una respuesta deseada. Mientras la industria aumentaba su productividad y las máquinas se volvían más complejas, el hombre por si solo no era suficiente para mantener una alta eficiencia y rapidez en la industria. Por ello nació la necesidad de estudiar nuevos y más complejos procesos que reemplazaban la mano humana por máquinas, computadores u autómatas capaces de trabajar a velocidades, exactitudes y exigencias requeridas [13].

Es así, que de la teoría de control y la automatización surgieron los controladores, que hasta la actualidad forman parte de la mayoría de los procesos industriales como refinerías, fábricas mineras, industrias de alimentos, petroquímicas, farmacéuticas, etc [6].

Para el diseño de controladores se deben tener en cuenta ciertas consideraciones por parte del equipo encargado de realizar la automatización. Las mismas que son de utilidad para obtener los resultados deseados. Estos son [14]:

- Un buen entendimiento del funcionamiento y de la dinámica del proceso a controlar
- Poseer un modelo matemático del sistema
- Establecer los puntos de operación de las variables internas del proceso, teniendo en cuenta los límites físicos y mecánicos de los componentes del sistema
- Definir el tipo de control a utilizar en base a los criterios de tiempos de respuesta, robustez deseada, estabilidad, precisión, respuesta transitoria y en estado permanente, capacidad computacional disponible, entre otros.
- Sintonizar, simular y evaluar los controladores diseñados.

1.4.5.1 Controlador PID

Los esquemas de control PID, desde la fecha de su planteamiento a la actualidad siguen teniendo vigencia en muchos de los procesos industriales. Por ello se lo considera como el control de retroalimentación más popular. Entonces, el estudio del esquema es fundamental en el campo de la automatización y control industrial.

Un control PID está compuesto de la suma de tres partes que están en función del error $e(t)$ del sistema: proporcional, integral y derivativa, la ecuación ideal del controlador es:

$$U_{PID}(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.6)$$

Donde:

K : es la ganancia proporcional del controlador

τ_i : es el tiempo integral o el inverso de la ganancia integral $K_i = \frac{1}{\tau_i}$

τ_d : es el tiempo o ganancia derivativa $K_d = \tau_d$

La componente proporcional produce una señal de control proporcional al error actual, hace que el error en estado estacionario disminuya, pero no lo anula.

Si la ganancia proporcional aumenta demasiado se producen oscilaciones en la salida del sistema e incluso puede tornarlo inestable (Ver Figura 1.7). En sistemas que presentan polos en el origen a lazo cerrado, un control proporcional es suficiente para que la salida del sistema siga correctamente la referencia.

Cuando el controlador abarca la parte proporcional, integral y derivativa, la ganancia proporcional K_p afecta las ganancias K_i y K_d , lo cual se debe tener en consideración al momento de sintonizar el controlador [15].

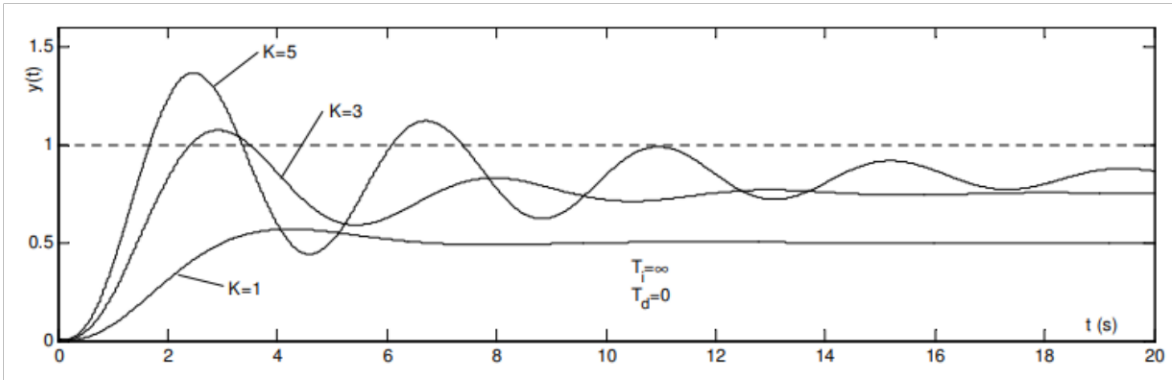


Figura 1.7. Sistema a lazo cerrado con controlador P(t) [15]

La acción integral reduce y anula el error en régimen permanente e incrementa la rapidez de respuesta del sistema mientras el tiempo integral τ_i disminuye. Si el valor del tiempo integral es muy pequeño se producen oscilaciones a la salida del sistema (Ver Figura 1.8).

La razón por la que la acción integral reduce a cero el error estacionario es porque la señal de control es proporcional a la integral del error, cuando el error es mayor la señal de control aumenta, mientras el error va disminuyendo la acción de control va tomando y manteniendo los valores de control hasta cuando el error se anule, es decir, la acción integral mantiene la señal de control que provocó que el error se anule.

En la realidad no existen controladores solo de tipo integral, lo más usual es combinarlo con una parte proporcional, obteniéndose controladores $PI(t)$. Esto se debe a que un integrador añade un polo en el origen del plano complejo S, por lo que podría provocar inestabilidad en el sistema. Además, las acciones de control integrales son muy pequeñas al momento de cambios de referencia, entonces la acción proporcional al error ayuda a mejorar la respuesta del sistema [16].

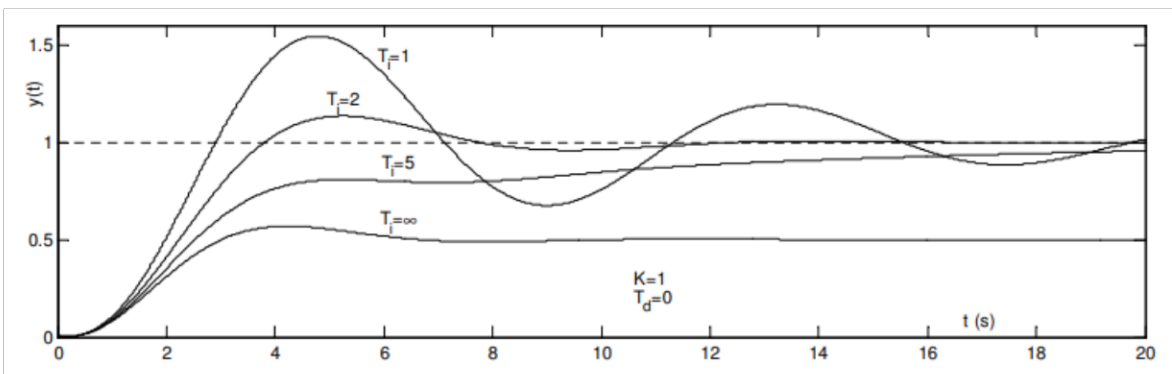


Figura 1.8. Sistema a lazo cerrado con controlador PI(t) [15]

La acción de control derivativa otorga señales de control que dependen de la tasa de cambio del error. Es útil como acción predictorica puesto que la derivada da una idea de los valores futuros que puede tomar el error, entonces la acción de control puede anticiparse a los valores que tomará la salida del sistema.

Esta acción por sí sola no anula el error en régimen permanente por lo que debe usarse en conjunto con la acción proporcional e integral (Ver Figura 1.9).

Una ventaja de la acción derivativa es que afecta la dinámica del sistema, reduciendo los sobre impulsos y el tiempo de establecimiento de la variable controlada.

Su desventaja surge cuando la salida del sistema tiene un contenido de señales a alta frecuencia, en este caso la acción derivativa amplifica el ruido, produciendo señales de control bruscas y aleatorias para el elemento final de control [16].

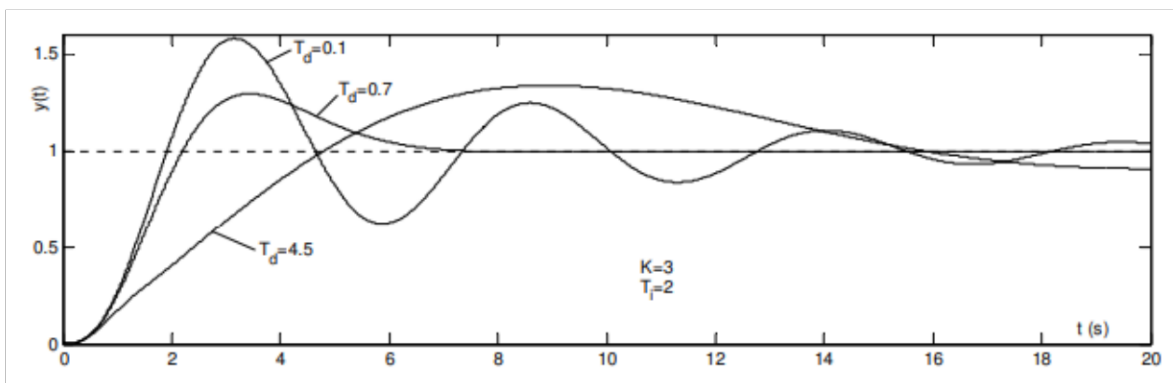


Figura 1.9. Sistema a lazo cerrado con controlador PID(t) [15]

1.4.5.2 Controlador PID no lineal propuesto por Han

Los controladores no lineales surgen de la necesidad de adaptar las señales de control a las no linealidades de los procesos industriales. Con ello se logra incrementar el rendimiento y la robustez de los controladores. Estos controladores se componen de dos partes, una región lineal que funciona siempre y cuando el error sea cercano o igual a cero, y el área no lineal que es utilizada para cuando el error incrementa, en general la región no lineal satura los errores grandes para que la señal de control no vuelva inestable al sistema. Han propone un controlador PID dado por la siguiente expresión [16]:

$$U = K_p \psi(e_p, \alpha_p, \delta_p) + K_i \psi(e_i, \alpha_i, \delta_i) + K_d \psi(e_d, \alpha_d, \delta_d) \quad (1.7)$$

Donde:

U : es la señal de control del PID no lineal

K_p, k_i, k_d : son las ganancias de las acciones proporcional, integral y derivativa

$\psi(x, \alpha, \delta)$: es la función no lineal cuya ecuación es

$$\psi(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^\alpha \text{sign}(x), & \text{si } |x| > \delta \\ \delta^{\alpha-1} x, & \text{si } |x| < \delta \end{cases} \quad (1.8)$$

En la Figura 10 se observa el comportamiento de la función no lineal propuesta por Han y una función completamente lineal.

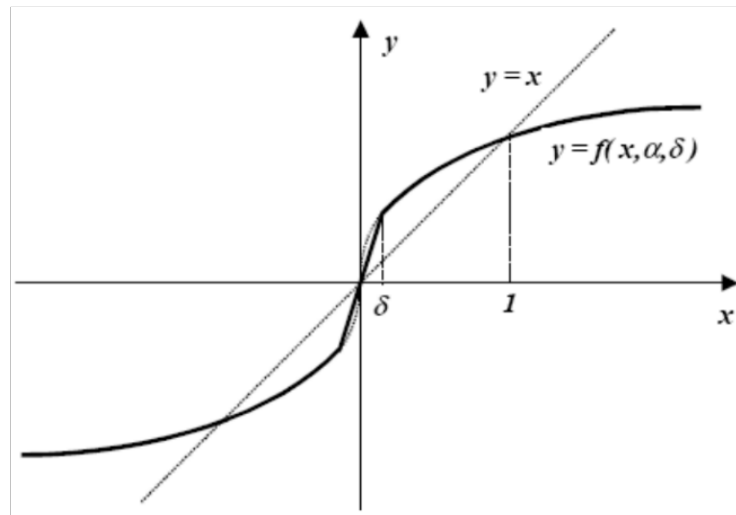


Figura 1.10. Función no lineal propuesta por Han [16]

El área de la región lineal está limitada por el parámetro δ , en cuanto al parámetro α es el encargado de determinar la respuesta de la región no lineal. Por lo tanto, para la sintonización del controlador PID no lineal se debe tomar en cuenta lo siguiente [17]:

Tabla 1.1. Efectos del valor de los parámetros del PID no lineal [16]

Parámetro	Valor	Efecto
α_p	< 1	Produce una ganancia pequeña cuando los errores son grandes. No afecta si los errores son pequeños
	> 1	Genera grandes ganancias para errores grandes y pequeños. Aumenta la sensibilidad ante cambios pequeños.
α_i	$-1 < \alpha_i < 0$	Reduce la acción integral eliminando el efecto Wind-Up cuando los errores son grandes
α_d	$\alpha_d > 1$	Reduce los efectos negativos producidos por el ruido al tener una ganancia pequeña ante errores pequeños.

1.4.5.3 CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

Los controladores por modos deslizantes se derivan a partir de los controladores de estructura variable, los cuales son destinados a tratar con procesos no lineales y variantes en el tiempo [4]. La idea de los controladores SMC es de llevar al error de la variable de salida del sistema a un valor final deseado de cero a través del deslizamiento sobre una superficie, como se aprecia en la Figura 1.11. Para ello se debe definir una ecuación de superficie $S(t)$ que represente el comportamiento global deseado.

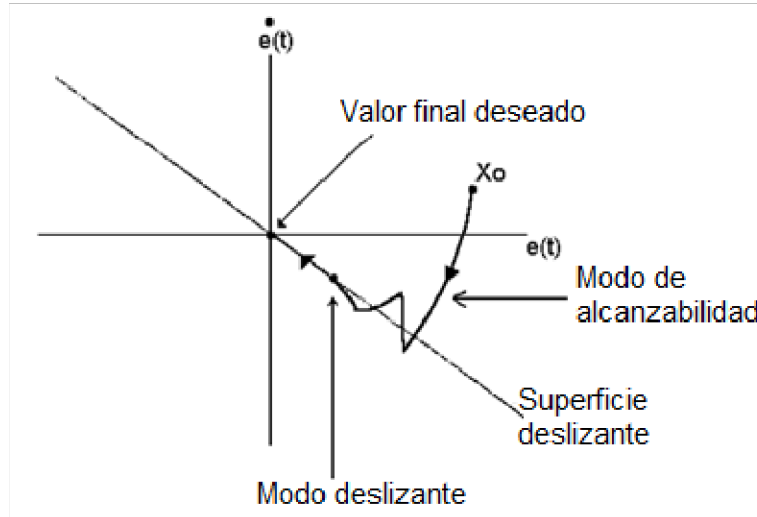


Figura 1.11. Interpretación gráfica de un controlador SMC [4]

Una ecuación diferencial-integral de superficie basada en el error se presenta en la ecuación (1.9):

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int_0^t e(t) dt \quad (1.9)$$

Donde n determina el orden del sistema, λ es un parámetro de sintonización, y $e(t) = R(t) - Y(t)$ es el error del sistema.

El objetivo de control es llevar a la variable controlada a un valor de referencia, asegurando un error en estado estable igual a cero, lo que matemáticamente se traduce en la condición de que $S(t)$ tenga un valor constante y $\frac{dS(t)}{dt} = 0$ para todo el tiempo.

Un controlador SMC está compuesto de dos partes, una continua y una discontinua, de tal manera que la señal de control está dada por:

$$U(t) = U_c(t) + U_D(t) \quad (1.10)$$

El esquema de implementación de un controlador SMC se muestra en la Figura 1.12

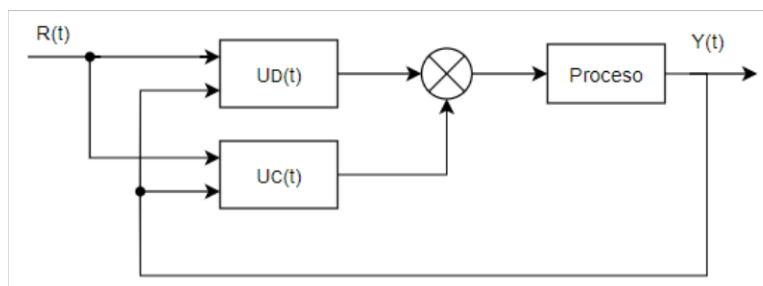


Figura 1.12. Estructura de un controlador SMC

La parte continua es una función que depende de la salida $Y(t)$ y la referencia $R(t)$ como se observa en la ecuación (1.11) y es la encargada de llevar al sistema al valor final deseado a través del deslizamiento por la superficie [16].

$$U_c(t) = f(Y(t), R(t)) \quad (1.11)$$

La parte discontinua mostrada en la ecuación (1.12) se encarga de incluir una no linealidad en la señal de control, la cual es discontinua a través de toda la superficie. Además, es la encargada de llevar al sistema a partir de un estado inicial a la superficie deslizante [16].

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (1.12)$$

Los parámetros K_D y δ son sintonizables. K_D representa la ganancia de la parte discontinua y determina el modo de acercamiento a la superficie deslizante. δ es un valor que trata de reducir el problema de chattering.

El switcheo (chattering) es un problema que afecta a la señal de control alrededor del punto de equilibrio deseado, produciendo valores que oscilan a alta frecuencia, y que por lo tanto puede afectar negativamente al elemento final de control. Para reducir este efecto se formuló la ecuación (1.12) que presenta transiciones suaves entre valores positivos o negativos de la superficie $S(t)$ como si se tratase de una función sigmoide. Esta función reemplazó a la señal de control discreta propuesta inicialmente dada por $U_D(t) = K_D \text{sign}(S(t))$ que como se puede observar representa una señal a trozos que toma valores positivos si $S(t) > 0$, negativos si $S(t) < 0$ y en el caso de que $S(t) = 0$ se presenta el efecto denominado chattering.

1.4.5.4 Controlador PID basado en SMC

Los controladores PID basados en SMC reemplazan la parte discreta $U_D(t)$ del control original dado por la ecuación (1.12) por un controlador continuo de superficie de tipo $PID(t)$, encargado de llevar el error; y por lo tanto el valor de superficie a cero [5]. Así, la salida de la ecuación de superficie $S(t)$ es realimentada al controlador de superficie, cuya referencia es cero para garantizar un error nulo en estado estacionario. A su vez, la salida del controlador de superficie $U_{PID}(t)$ se suma a la salida del controlador continuo $U_C(t)$, con lo que se obtiene la señal de control total.

$$U(t) = U_C(t) + U_{PID}(t) \quad (1.13)$$

El controlador de superficie utilizado en este proyecto es de tipo PI. Su esquema se presenta en la Figura 1.13. La parte derivativa del controlador PID se elimina debido a que la velocidad lineal y angular medidas por el robot móvil Pioneer P3DX tienen un alto contenido de ruido, por lo que la derivada amplifica la señal de alta frecuencia y se obtiene señales de control inestables en el tiempo que hacen más complicado el control del sistema.

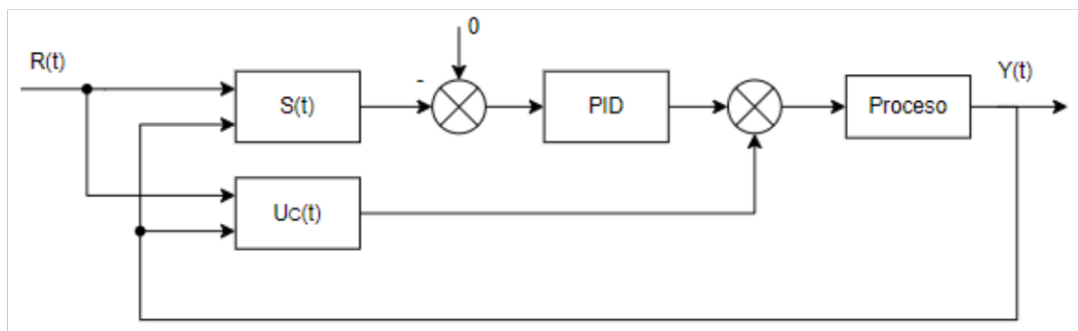


Figura 1.13. Estructura de un controlador PID basado en SMC

La señal de control continua, la superficie y el controlador de superficie serán desarrollados en el siguiente capítulo. Los parámetros del controlador PID de superficie se sintonizan de manera heurística hasta conseguir un desempeño deseado.

Además, se utiliza el método de Han para incluir no linealidades en la ecuación de superficie, en el controlador PI de superficie o en ambos a la vez, desarrollando de esta manera los cuatro controladores planteados en este documento. La inclusión de no linealidades tiene el objetivo de adaptar el esquema de control ante la no linealidad característica del robot móvil. Esto se evidencia en el desarrollo del capítulo 2.

1.4.6 ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Los índices de desempeño son una herramienta utilizada para la comparación de controladores. En el presente documento se deben comparar los cuatro esquemas de control propuestos.

Para determinar la eficiencia y el funcionamiento óptimo de los controladores se usa el criterio de escoger la estrategia de control que minimice los índices de desempeño [16].

1.4.6.1 Integral del cuadrado del error

Se calcula mediante la expresión (1.14):

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (1.14)$$

El término de error al cuadrado maximiza los errores grandes pero no afecta a los errores pequeños. Por esto, el índice es usado para acelerar la respuesta de los procesos. Su uso debe ser limitado debido a que al incrementar la velocidad de respuesta de los sistemas también puede incrementar las oscilaciones [16].

El límite superior de la integral se determina por el tiempo en el que se hace funcionar el sistema, pero se recomienda trabajar hasta el tiempo de establecimiento del sistema [16].

1.4.6.2 Índice de variación total

El índice Tvu se calcula con la expresión (1.15):

$$Tvu = \sum_{i=1}^{\infty} |U_{i+1} - U_i| \quad (1.15)$$

Este índice evalúa la señal de control para determinar el esfuerzo al que está sometido el elemento final de control. Su finalidad es suavizar las señales de control para que no superen los límites físicos de funcionamiento del actuador [16].

1.4.6.3 Máximo sobre impulso

La característica dinámica del máximo sobre impulso se usa como índice para tratar de reducir los picos en las respuestas de los sistemas. Se mide a partir de la referencia con la máxima altura que alcanza la respuesta del proceso [16].

1.4.6.4 Tiempo de establecimiento

El tiempo de establecimiento es una medida de la característica transitoria de un proceso y se define como: el tiempo que le toma al sistema en estar dentro del rango del 3% a 5% de su valor en estado estable [16].

2 METODOLOGÍA

2.1 ROBOT PIONEER 3DX

El Pioneer 3-DX del fabricante Adept MobileRobots es un robot móvil autónomo de tracción diferencial (uniciclo), su estructura es pequeña con relación a otros robots y de peso ligero, sin embargo, es resistente y durante el uso que se le ha dado al mismo ha demostrado ser de gran durabilidad, por lo que es muy usado en el área de la investigación y muy didáctico en el campo educacional, de esta manera, el Pioneer 3DX es un buen elemento para pruebas en laboratorios de desarrollo de control y robótica, y muy útil en aulas de clase.

Además, la plataforma de su fabricante provee al usuario librerías, bibliotecas y aplicaciones enfocadas a la robótica para comandar este robot lo que ha acelerado el desarrollo de controladores para este autómatas móvil. De la misma manera que brinda el soporte necesario tanto en la parte física como en la programable del robot, el mismo puede estar actualizándose continuamente y ser personalizable agregando o quitando piezas, dispositivos, sensores o bien modificando el software ajustándolo a las necesidades de cada usuario según sea el caso de estudio o aplicación [18].

A continuación, en la Figura 2.1 se muestran algunos criterios de construcción que tiene el robot móvil Pioneer 3DX como lo son sus dimensiones dadas en milímetros, medidas que son de gran utilidad posteriormente para la modelación del este robot con el que se desarrolla el presente trabajo.

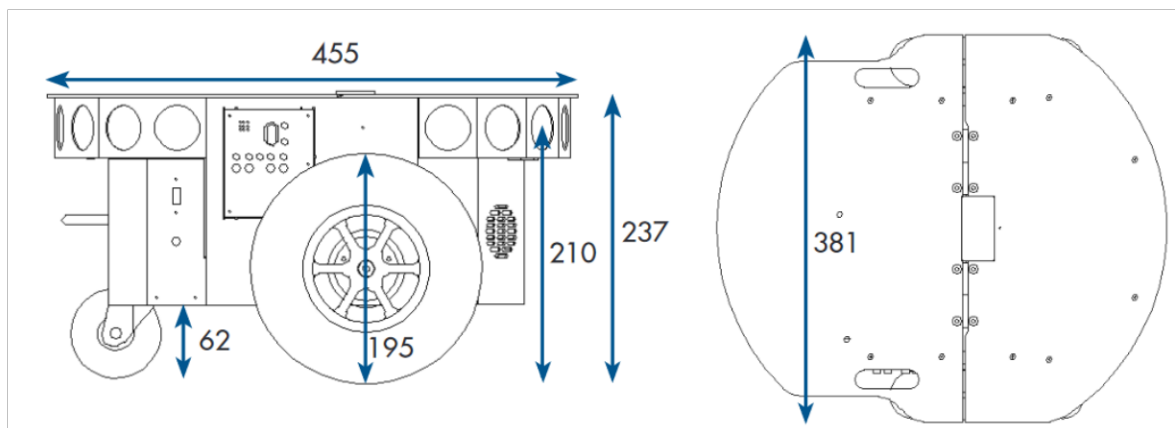


Figura 2.1. Dimensiones de Pioneer 3DX en milímetros [18]

2.1.1 MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT PIONEER 3DX

El modelo cinemático del robot móvil es útil para el diseño de controladores destinados al seguimiento de trayectorias. Este modelo solo toma en cuenta la cinemática del robot y no su dinámica. Por ello, el modelo cinemático es útil cuando el robot funciona a bajas velocidades y no es afectado por fuerzas externas, o perturbaciones como momentos de inercia y rozamientos [3].

Para determinar las ecuaciones del modelo cinemático se toma en cuenta un eje de coordenadas ubicado en el centro del eje de las ruedas del robot (Ver Figura 2.2).

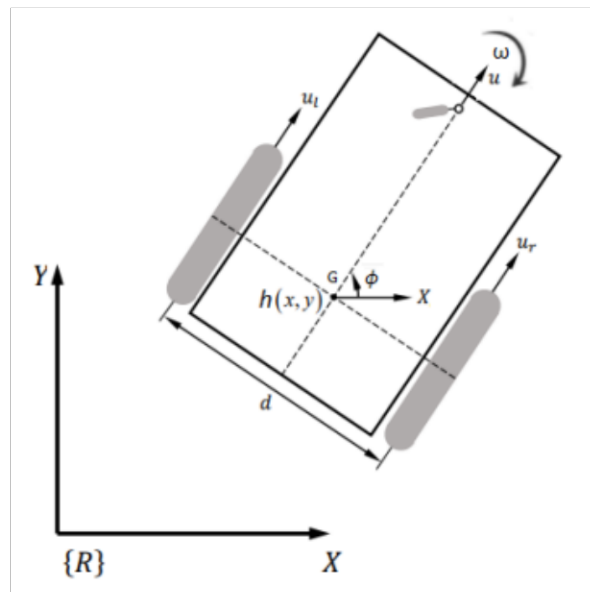


Figura 2.2. Representación cinemática del robot móvil con restricción no holonómica [19]

De esta manera, las ecuaciones cinemáticas del robot móvil son:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Donde:

\dot{x}, \dot{y} : son las velocidades del robot en el eje x y y respectivamente en [m/s]

x, y : son las coordenadas del robot en el sistema de coordenadas global $\{R\}$ en [m]

$\dot{\varphi}$: es la velocidad angular del robot en [rad/s]

φ : es el ángulo de orientación del robot en [rad]

v, w : corresponden a la velocidad lineal y angular del robot en [m/s] y en [rad/s] respectivamente.

Se puede apreciar que las entradas al sistema corresponden a una velocidad lineal y una velocidad angular del robot. Pero en la realidad lo que puede ser configurable son las velocidades de las ruedas izquierda y derecha. Por lo que para relacionar la velocidad de cada rueda con las del robot se hace uso de las siguientes ecuaciones:

$$w_i = \frac{v}{r} - \frac{w l}{2 r} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (2.2)$$

$$w_d = \frac{v}{r} + \frac{w l}{2 r} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (2.3)$$

Donde l corresponde a la distancia de separación entre ruedas y r es el radio de cada rueda en [m]. Las ecuaciones (2.2) y (2.3) son utilizadas para calcular las velocidades de cada rueda con las que se debe configurar el robot Pioneer 3DX en el software CoppeliaSim mediante la comunicación síncrona con Matlab.

A partir de la ecuación (2.1) se obtiene la expresión de la restricción no holonómica, la cual expresa la incapacidad del robot móvil en desplazarse en dirección lateral el eje de las ruedas [19].

$$\dot{y} \cos(\varphi) + \dot{x} \sin(\varphi) = 0 \quad (2.4)$$

En estas condiciones el movimiento del robot se dificulta, puesto que para moverse en dirección lateral el robot realiza primeramente una corrección orientación y posteriormente el desplazamiento. Para mejorar la mencionada restricción, se desplaza el eje de interés una distancia a desde el eje de las ruedas (Ver Figura 2.3) [19]. Lo usual es hacer coincidir el nuevo punto con el centro de gravedad del robot. En el caso del robot Pioneer 3DX el valor recomendado ubicar el eje en la posición $a = 0.2 \text{ m}$.

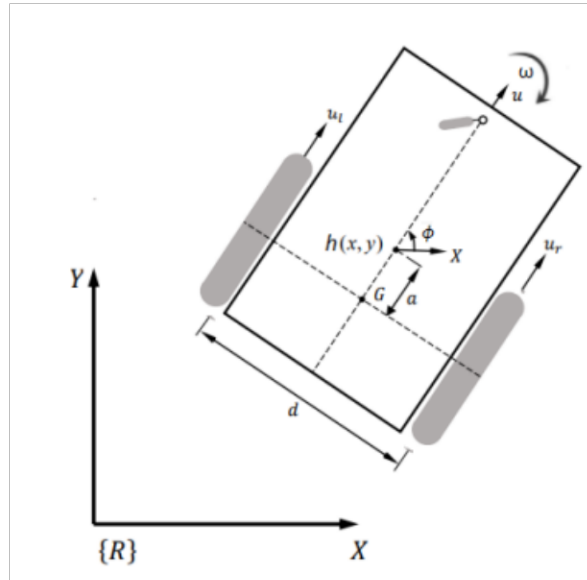


Figura 2.3. Representación cinemática del robot móvil con restricción no holonómica mejorada [19]

Las nuevas expresiones que representan al sistema son:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & a \cos(\varphi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

La restricción no holonómica se observa en (2.6):

$$\dot{y} \cos(\varphi) + \dot{x} \sin(\varphi) + a\dot{\varphi} = 0 \quad (2.6)$$

2.1.2 MODELO APROXIMADO DEL ROBOT PIONEER 3DX

Al utilizar el método de Smith se obtienen las funciones de transferencia de primer orden más retardo de la velocidad lineal y angular del robot móvil.

El robot Pioneer 3DX cuenta con controladores de velocidad internos, por lo que las velocidades reales obtenidas son iguales a las velocidades de referencia configuradas, de allí que la ganancia de las funciones de transferencia es unitaria.

2.1.2.1 Velocidad lineal

La Figura 2.4 muestra la respuesta de la velocidad lineal real del robot ante una entrada paso de velocidad lineal de referencia:

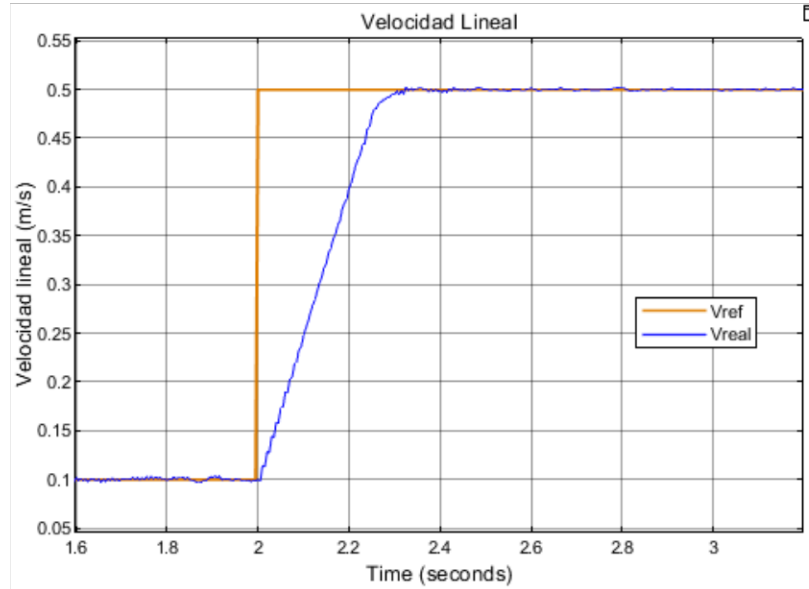


Figura 2.4. Curva de reacción de la velocidad lineal real y de referencia

Los parámetros de la función de transferencia se calculan a continuación:

$$K_V = \frac{\Delta_v}{\partial_v} = \frac{0.4}{0.4} = 1 \quad (2.7)$$

$$\tau_V = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) = 1.5(2.171 - 2.0778) = 0.1398 \text{ [s]} \quad (2.8)$$

$$\theta_V = t_{63.2\%} - \tau_V = 0.0312 \text{ [s]} \quad (2.9)$$

$$G_v(s) = \frac{e^{-0.0312s}}{0.1398s + 1} \quad (2.10)$$

En la Figura 2.5 se valida el modelo de velocidad lineal real con el aproximado:

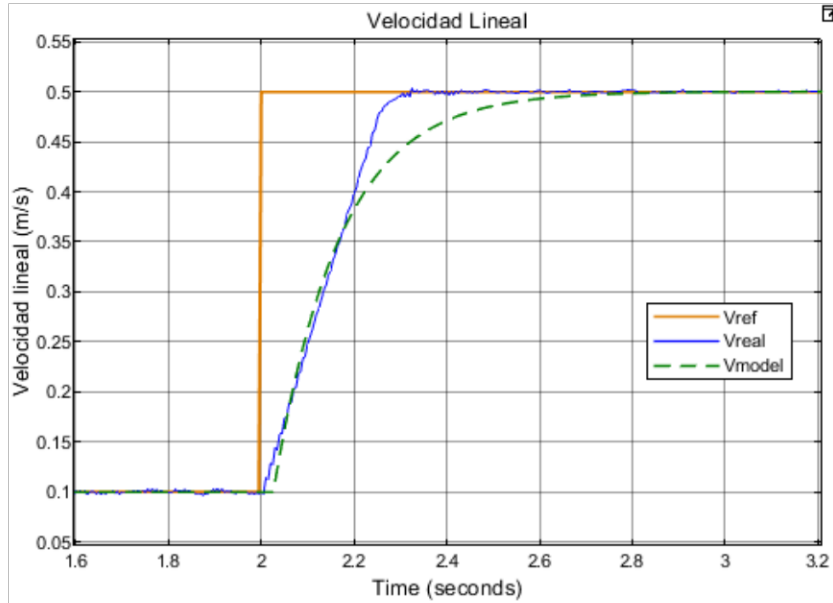


Figura 2.5. Validación del modelo de velocidad lineal

2.1.2.2 Velocidad angular

La Figura 2.6 muestra la respuesta de la velocidad angular real del robot ante una entrada paso de velocidad angular de referencia:

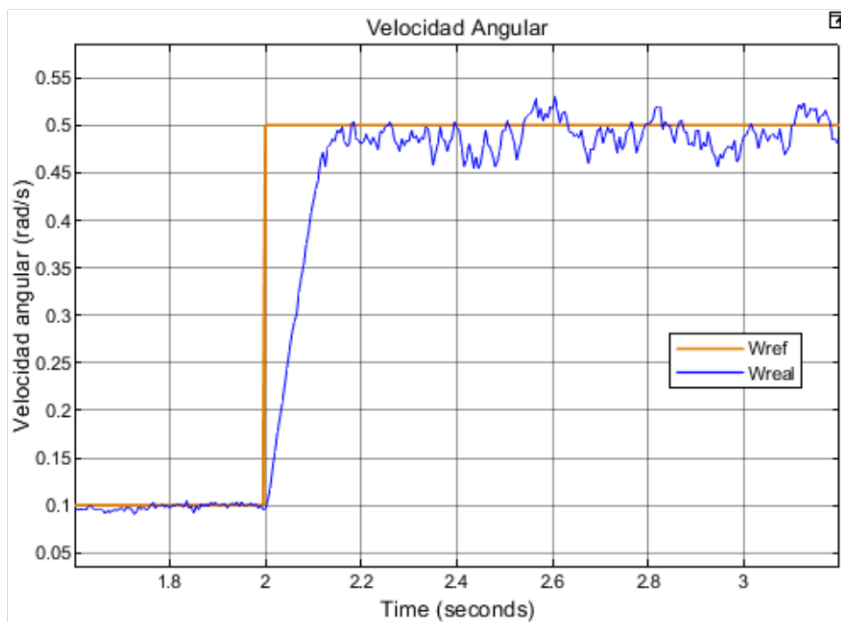


Figura 2.6. Curva de reacción de la velocidad angular real y de referencia

Los parámetros de la función de transferencia se calculan a continuación:

$$K_w = \frac{\Delta_w}{\partial_w} = \frac{0.4}{0.4} = 1 \quad (2.11)$$

$$\tau_w = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) = 1.5(2.08 - 2.0365) = 0.0652 \text{ [s]} \quad (2.12)$$

$$\theta_w = t_{63.2\%} - \tau_w = 0.0148 \text{ [s]} \quad (2.13)$$

$$G_w(s) = \frac{e^{-0.0148s}}{0.0652s + 1} \quad (2.14)$$

En la Figura 2.7 se valida el modelo de velocidad angular real con el aproximado:

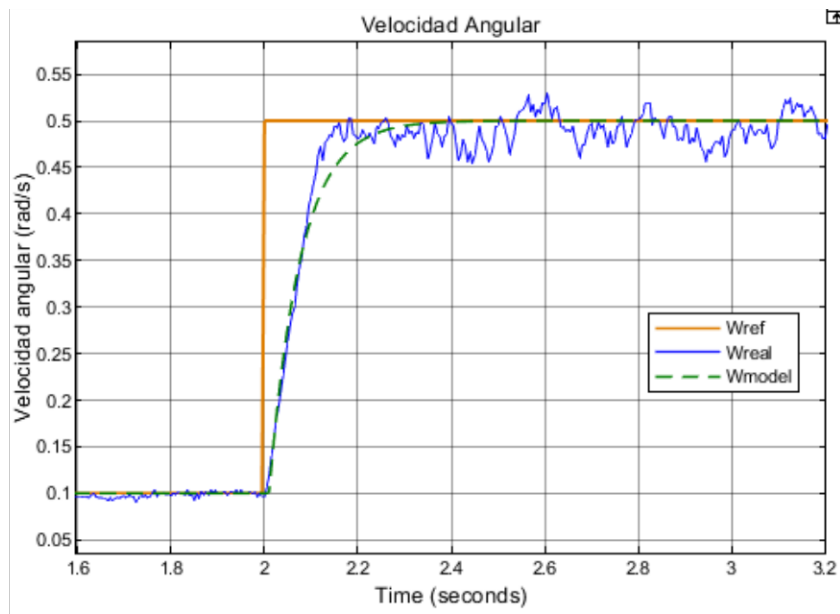


Figura 2.7. Validación del modelo de velocidad angular

2.2 GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS

La generación de trayectorias corresponde una parte fundamental de este proyecto, puesto que define un camino parametrizado en el tiempo por donde el robot móvil debe desplazarse. Para esto se define el concepto de Robot Virtual, el cual genera las posiciones (x_{vir}, y_{vir}) , velocidades $(\dot{x}_{vir}, \dot{y}_{vir})$ y ángulo de orientación φ_{vir} que debe ir adoptando el robot real en el transcurso del tiempo.

Adicionalmente, por motivos de salvaguardar los actuadores (motores) del robot móvil se limitan las señales de velocidades obtenidas por el robot virtual, las cuales son valores de

referencia que debe adoptar el robot real. Para el caso de la velocidad lineal el saturador se configura en máximo $1 \left[\frac{m}{s} \right]$ y mínimo $0 \left[\frac{m}{s} \right]$ (debido a que el robot no puede moverse hacia atrás). El saturador de la velocidad angular se configura en máximo $1.25 \left[\frac{rad}{s} \right]$ y mínimo $-1 \left[\frac{rad}{s} \right]$ lo que contempla giros a la derecha e izquierda. Estos valores se determinaron en base a la hoja de datos del robot móvil Pioneer P3DX que indica que la velocidad máxima de cada rueda es de $1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$ [18].

En la Figura 2.8 se aprecia la estructura implementada en Simulink del robot virtual para la obtención de referencias del robot real.

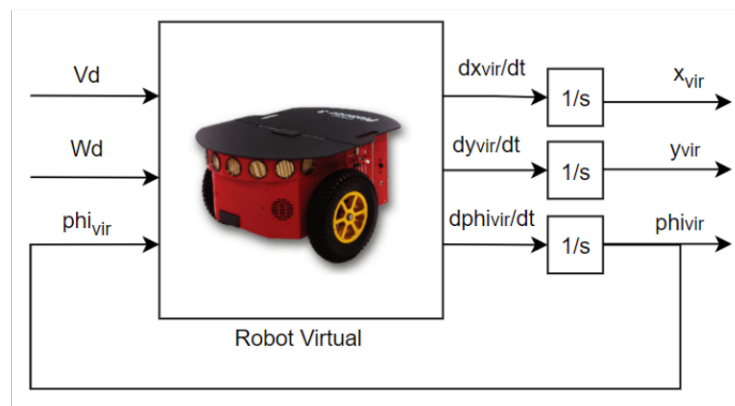


Figura 2.8. Esquema del robot Virtual

Las entradas configurables corresponden a la velocidad lineal V_d y velocidad angular W_d deseadas, mientras que el ángulo φ_{vir} se realimenta mediante la integración de la salida $\dot{\varphi}_{vir}$. Las relaciones de entrada y salida del robot virtual corresponden a la ecuación (2.1).

2.2.1 GENERACIÓN DE TRAYECTORIA CIRCULAR

Para la generación de la trayectoria circular se asume que el robot se desplaza a velocidad angular constante, para ello se utiliza la ecuación del movimiento circular uniforme mostrada en (2.15):

$$V_d = R_d W_d \quad (2.15)$$

Donde R_d es el radio deseado de la trayectoria circular, uno de los parámetros V_d o W_d debe ser elegido a criterio del diseñador y se debe calcular el otro. Para ello hay que tener

en cuenta las limitaciones físicas del robot real, en este proyecto se eligió velocidades cercanas al punto de operación en donde se determinó las funciones de transferencia aproximadas de velocidad lineal y angular. Los valores se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Parámetros calculados para la trayectoria circular

Parámetro	Valor
V_d	$0.4 \left[\frac{m}{s} \right]$
W_d	$0.2 \left[\frac{rad}{s} \right]$
R_d	$2 [m]$

2.2.2 GENERACIÓN DE TRAYECTORIA CUADRANGULAR

El criterio de para la generación de la trayectoria cuadrangular consiste en realizar desplazamientos lineales a velocidad constante y velocidad angular igual a cero, en las esquinas realizar giros a velocidad lineal igual a cero y velocidad angular constante. Es decir, para que el robot recorra una línea recta se utiliza las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniforme y para los giros se usa el concepto de velocidad angular.

Las ecuaciones utilizadas se muestran en (2.16) y (2.17):

$$x = V_d t_1 \tag{2.16}$$

$$W_d = \frac{\varphi}{t_2} \tag{2.17}$$

Donde

x : representa la distancia recorrida a la velocidad V_d durante el tiempo t_1 en metros, su valor corresponde a la longitud del un lado del cuadrado.

W_d : es la velocidad angular con la que gira el robot virtual para recorrer un ángulo φ durante el tiempo t_2 en $\frac{rad}{s}$.

Los valores calculados se presentan en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Parámetros calculados para la trayectoria cuadrangular

Parámetro	Valor
x	4 [m]
V_d	0.4 $\left[\frac{m}{s}\right]$
t_1	10 [s]
φ	$\frac{\pi}{2}$ [rad]
W_d	0.3927 $\left[\frac{rad}{s}\right]$
t_2	4 [s]

2.3 ESQUEMA DE CONTROL

El esquema general de control para el robot Pioneer P3DX se muestra en la Figura 2.9 que consta de los siguientes elementos:

- Generador de trayectorias: otorga las señales de velocidad lineal y angular que debe tener el robot virtual para generar una trayectoria circular o cuadrangular.
- Robot virtual: contiene las ecuaciones del modelo cinemático no holonómico de un robot móvil ideal. Proporciona las señales de posición y velocidad en el sistema de referencia (x, y) , y el ángulo de orientación φ que debe seguir el robot real para cumplir con la trayectoria configurada.
- Controlador de posición: atribuye las señales de velocidad lineal y angular de referencia para que el robot real se acerque al robot virtual. Tiene como entradas

- los errores de posición en los ejes x y y , las velocidades del robot virtual en los ejes x y y , las posiciones del robot real en x y y y el ángulo de orientación del robot real.
- Esquemas de control de velocidad lineal y angular: concierne a los reguladores PI basados en SMC con no linealidades propuestos en este documento para controlar las velocidades lineal y angular del robot real.
 - Robot real: representa al robot Pioneer P3DX simulado por el software CoppeliaSim. Este sistema recibe las señales de control dadas por los reguladores de velocidad lineal y angular calculadas en Simulink, reproduce el comportamiento real mediante cálculos propios realizados en CoppeliSim y realimenta a Simulink los valores de posición, orientación y velocidad.

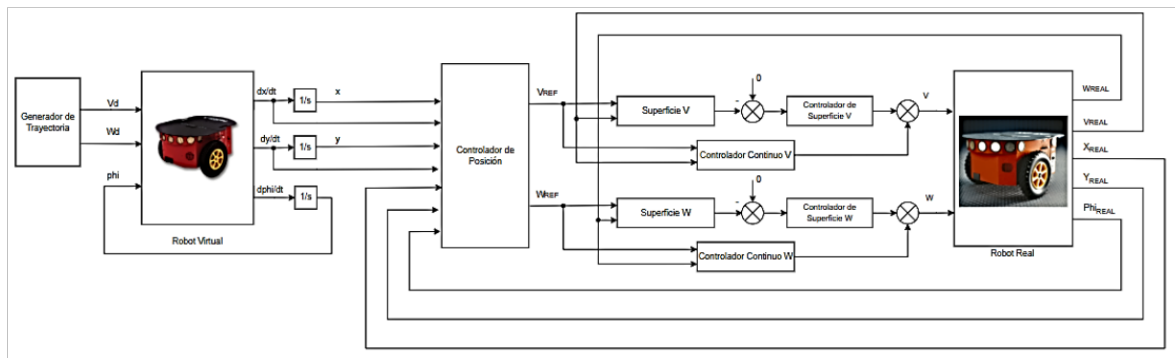


Figura 2.9. Esquema de control para el seguimiento de trayectorias

El esquema de control así como cada uno de sus elementos puede ser apreciado de mejor manera en el ANEXO 1.

2.4 DISEÑO DE CONTROLADORES

Los controladores son una parte fundamental de las aplicaciones de seguimiento de trayectorias para robots móviles puesto que aseguran que el robot recorre las posiciones deseadas en los instantes de tiempo requeridos.

A continuación, se presenta el diseño matemático de los controladores necesarios para cumplir con los objetivos propuestos en este proyecto.

2.4.1 CONTROLADOR DE POSICIÓN

Antes del diseño de los controladores de velocidad, es necesario obtener las señales de referencia V_{ref} y W_{ref} . Para lo cual se propone usar un controlador cinemático con restricción no holonómica mejorada de posición el cual se encarga de calcular la velocidad lineal y angular de referencia necesarias para que el robot siga las trayectorias propuestas.

Con esto el esquema total de control se transforma en un sistema de realimentación en cascada, en el que el lazo externo se forma por el controlador de posición y el lazo interno por los controladores de velocidad lineal y angular.

Hay que recalcar que el robot móvil Pioneer 3DX cuenta con controladores internos de velocidad para las ruedas izquierda y derecha, más su sintonización no se revisará en este documento y solo se asumirá que los valores w_i y w_d enviados de Simulink a CoppeliaSim son las velocidades que adaptan cada una de las ruedas del robot móvil.

El cálculo de estas señales se realiza mediante los valores actuales que presenta el robot virtual y los valores actuales del robot real. La ecuación del controlador cinemático se muestra en la ecuación (2.18) [20].

$$\begin{bmatrix} V_{ref} \\ W_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{REAL}) & \sin(\varphi_{REAL}) \\ -\frac{1}{a} \sin(\varphi_{REAL}) & \frac{1}{a} \cos(\varphi_{REAL}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{vir}^{\cdot} + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} e_x\right) \\ Y_{vir}^{\cdot} + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} e_y\right) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Donde:

V_{REF}, W_{REF} : son las señales de referencia que ingresan a los controladores de velocidad lineal y angular en $\left[\frac{m}{s}\right]$ y $\left[\frac{rad}{s}\right]$ respectivamente.

a : es la distancia de separación del eje de referencia para el modelo cinemático con restricción no holonómica mejorada en $[m]$.

φ_{REAL} : es el ángulo de orientación del robot real en $[rad]$.

$X_{vir}^{\cdot}, Y_{vir}^{\cdot}$: son las velocidades en el eje x y y del robot virtual en $[m/s]$.

e_x, e_y : son los errores de posición en el eje x y y entre el robot real y el robot virtual en $[m]$

l_x, l_y : son constantes de saturación en el eje x y y , sus valores ser números reales.

k_x, k_y : son constantes de sintonización del controlador de posición cuyo valor debe ser mayor que cero.

La función tangente hiperbólica es usada para evitar la saturación de las velocidades de referencia deseadas [20].

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 Sliding Mode Controller for Nonlinear Processes,» *American Chemical Society*, vol. 40, pp. 2660-2667, 2001.
- [6] L. García, Control digital, 2da ed., Medellín, 2009.
- [7] A. Carrillo, Sistemas Automáticos de Control, Fondo Editorial UNERMB, 2011.
- [8] C. Smith, Control Automático de Procesos, México: LIMUSA, 1991.
- [9] «Empirical Model Identification,» de *Dynamic Behaviour of typical process systems*, sf, pp. 175-181.
- [10] A. Ollero, Robótica, manipuladores y robots móviles, BIXAREU, Ed., Barcelona: MARCOMBO, S.A., 2001.
- [11] C. Guevara y D. Guevara, «DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL BASADAS EN UN MODELO DE ORDEN REDUCIDO Y APLICADAS AL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS PARA LA PLATAFORMA ROBÓTICA PIONNER 3DX,» Quito , 2016.
- [12] 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, 2015.
- [13] E. Martínez, «Controladores Automáticos,» Maturín, 2013.
- [14] RIPIPSA, «AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL,» 2022. [En línea]. Available: <https://ripipsacobots.com/automatizacion-industrial/>. [Último acceso: 20 02 2022].
- [15] W. Cova, «Control PID - Un enfoque descriptivo,» 12 2005. [En línea]. Available: <http://www.frlr.utn.edu.ar/archivos/alumnos/electronica/catedras/38-sistemas-de->

control-aplicado/Publicaciones/Control_PID_Enfoque_Descriptivo.pdf. [Último acceso: 25 01 2022].

- [16] M. Vásquez y J. Yanascual, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CONTROLADORES POR MODOS DESLIZANTES Y MODOS DESLIZANTES DINÁMICOS A PARTIR DE SUPERFICIES NO LINEALES APLICADOS A UN TANQUE DE MEZCLADO Y A UN REACTOR DE FASE NO MÍNIMA,» Quito, 2021.
- [17] 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.
- [18] Adept Technology, Inc, «Generation Robots,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.generationrobots.com/media/Pioneer3DX-P3DX-RevA.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [19] P. Sosa, «DISEÑO DE UN ROBOT MÓVIL NO HOLONÓMICO TIPO UNICICLO PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS,» Quito, 2021.
- [20] F. Rossomando, C. Soria y R. Carelli, «Control de Robots Móviles con Incertidumbres Dinámicas usando Redes de Base Radial,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 7, nº 4, pp. 28-35, 2010.

5 ANEXOS

ANEXO I

ESQUEMA DE CONTROL PARA EL SEGUIENTO DE TRAYECTORIA

