



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

TEMA:

**Implementación de sistemas de control PID en robots móviles  
autónomos usando entornos de simulación**

AUTOR:

Vera Vergara, Nathaly Silvana

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de  
**INGENIERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

TUTOR:

M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio

Guayaquil, Ecuador

3 de marzo del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente Trabajo de Integración Curricular fue realizado en su totalidad por el Sr. **Vera Vergara, Nathaly Silvana** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**.

TUTOR

M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 3 días del mes de marzo del año 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Vera Vergara, Nathaly Silvana**

**DECLARÓ QUE:**

El Trabajo de Integración Curricular “**Implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Integración Curricular referido.

Guayaquil, a los 3 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

VERA VERGARA, NATHALY SILVANA



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Vera Vergara, Nathaly Silvana**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Integración Curricular: **“Implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 3 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

VERA VERGARA, NATHALY SILVANA

# REPORTE DE URKUND

**URKUND** Fernando Palacios Meléndez (edwin\_palacios)

**Documento** [Vera\\_Nathaly.docx](#) (D130858434)

**Presentado** 2022-03-18 23:25 (-05:00)

**Presentado por** fernandopm23@hotmail.com

**Recibido** edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

**Mensaje** Revisión TIC Nathaly Vera [Mostrar el mensaje completo](#)

0% de estas 17 páginas, se componen de texto presente en 0 fuentes.

**Lista de fuentes**

Categoría	Enlace/nombre de archivo
>	<a href="https://docplayer.es/82013248-Universidad-cat...">https://docplayer.es/82013248-Universidad-cat...</a>
	<a href="#">Complexivo Cesar Madrid.docx</a>
	<a href="https://www.studocu.com/es-mx/document/in...">https://www.studocu.com/es-mx/document/in...</a>
	<b>Fuentes alternativas</b>
	<b>Fuentes no usadas</b>

1 Advertencias. Reiniciar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y

AUTOMATIZACIÓN

TEMA:

Implementación de sistemas de control PID en robots  
móviles autónomos usando entornos de simulación

AUTOR: Vera Vergara, Nathaly Silvana

Trabajo de Integración Curricular

previo a

la obtención del título de INGENIERA ELECTRÓNICA Y  
AUTOMATIZACIÓN

TUTOR: M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio

Guayaquil, Ecuador

TUTOR

M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio

## **DEDICATORIA**

Dedico con todo mi corazón mi trabajo de integración curricular y logro académico a Dios, pues es quien me dio la bendición de poder llegar y obtener este logro, porque a pesar de cada situación, resbalón, dificultad me ha permitido estar y llegar hasta aquí.

También se la dedico a mi familia por ser mi motivación de nunca rendirme, que a pesar de que los caminos sean rocosos debía luchar para obtener mis metas y poder ser un orgullo y ejemplo.

## **EL AUTOR**

VERA VERGARA, NATHALY SILVANA

## **AGRADECIMIENTO**

A pesar de que no ha sido fácil el proceso, estoy logrando culminar y obtener una afable titulación profesional y quiero agradecer en primer lugar, a Dios por tan bueno que ha sido conmigo, a mi familia por esforzarse tanto con la educación y valores que inculcaron en mi vida, a mi padre por ser la mejor bendición que Dios me dio y permitirme estudiar con su esfuerzo, a mi madre por su inmenso amor, esfuerzo y educación que me formo y me inculco llegar a prepararme profesionalmente, a mi hermana por ser mi motivación y saber que debo darle un buen ejemplo, a mi novio por siempre estar ahí ayudándome y apoyándome en seguir adelante. También agradezco a cada docente de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil que me educaron y compartieron sus conocimientos para poder formarme académicamente, muchas gracias.

**EL AUTOR**

**VERA VERGARA, NATHALY SILVANA**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f.

**M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús**

DECANO

f.

**M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando**

DIRECTOR DE CARRERA

f.

**M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando**

OPONENTE



## Índice General

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tablas.....	xiii
Resumen .....	xiv
Capítulo 1: Generalidades del trabajo .....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes. ....	2
1.3. Definición del Problema.....	3
1.4. Justificación del Problema.....	3
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	3
1.5.1. Objetivo General.....	3
1.5.2. Objetivos Específicos. ....	3
1.6. Hipótesis.....	4
1.7. Metodología de Investigación.....	4
Capítulo 2: Fundamentación teórica. ....	5
2.1. Introducción de los sistemas de control.....	5
2.2. Controlador ON-OFF.....	5
2.3. Controlador P. ....	6
2.4. Controlador PI. ....	7
2.5. Controlador PID.....	8
2.6. Medidas de rendimiento del paso unitario PID.....	9
2.6.1. Criterio de rendimiento de sobreimpulso máximo:.....	10
2.6.2. Criterio de tiempo de ajuste:.....	11
2.6.3. Criterio de tiempo de subida:.....	11
2.6.4. Criterio de error cuadrático medio de la respuesta al escalón unitario:.....	11

2.7.	Problemas básicos en el diseño del sistema de control. ....	12
2.8.	Descripción del modelo cinemático de un robot móvil.....	13
	Capítulo 3: Diseño, simulación y análisis de resultados .....	16
3.1.	Descripción del entorno de simulación.....	16
3.2.	Descripción de la simulación del robot móvil.....	17
3.3.	Aplicación del controlador PID. ....	18
	3.3.1. Cálculo de los parámetros PID y diseño de los controladores .....	19
	3.3.2. Comparación de los algoritmos de supervisión .....	28
	Conclusiones. ....	31
	Recomendaciones. ....	32
	Bibliografía .....	33

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Representación de bloques y gráfica del control ON-OFF con histéresis.....	5
Figura 2. 2: Representación de bloques del controlador P. ....	6
Figura 2. 3: Representación de bloques y gráfica del controlador P.....	7
Figura 2. 4: Representación de bloques y gráfica del controlador PI.....	7
Figura 2. 5: Representación del controlador PID. ....	8
Figura 2. 6: Diagrama de bloques del sistema de control PID. ....	10
Figura 2. 7: (a) Robot de accionamiento diferencial ideal, y (b) Coordenadas relativas y globales. ....	14

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Entorno de simulación Simiam para MatLab/Simulink. ....	17
Figura 3. 2: Diagrama ASM del patrón de movimiento del robot móvil. ....	18
Figura 3. 3: Respuesta al escalón del controlador PID para los coeficientes $K_p = 1$ , $K_i = 0$ y $K_d = 0$ . ....	21
Figura 3. 4: Respuesta al escalón del controlador PID para los coeficientes $K_p = 9$ , $K_i = 0$ y $K_d = 0$ . ....	21
Figura 3. 5: Respuesta al escalón del controlador PID para los coeficientes $K_p = 40$ , $K_i = 3$ y $K_d = 2$ . ....	22
Figura 3. 6: Respuestas al escalón del sistema sin controlador (azul) y controlado por PID (verde).....	23
Figura 3. 7: Gráficas de la respuesta en frecuencia (Hz) para estimación no paramétrica utilizando SIT. ....	23
Figura 3. 8: Caso del robot simulado que golpea con un obstáculo para escenario 1. ....	26
Figura 3. 9: Respuesta al escalón del controlador PID para escenario 1. ...	26

Figura 3. 10: Caso del robot simulado evadiendo obstáculos para escenario 2. .....	27
Figura 3. 11: Respuesta al escalón del controlador PID para escenario 2. .	27
Figura 3. 12: Comparativa de la respuesta al escalón del controlador PID para los escenarios 1 y 2. ....	28
Figura 3. 13: Escenario general del entorno de simulación del robot móvil y objetos estáticos. ....	29
Figura 3. 14: Representación de la trayectoria del robot móvil. ....	29

## Índice de Tablas

### Capítulo 2

Tabla 2. 1: Características principales del control y la gestión de los proyectos. .....	13
---	----

### Capítulo 3

Tabla 3. 1: Efectos independientes de los parámetros en el controlador PID .....	20
Tabla 3. 2: Resumen de los datos obtenidos con los parámetros del controlador PID. ....	25
Tabla 3. 3: Resumen de resultados obtenidos para los escenarios 1 y 2. ...	29

## Resumen

Con la expansión de la automatización, cada vez más tareas son realizadas por robots. Este fenómeno, que al principio afectaba principalmente a la industria, se está extendiendo progresivamente a otros ámbitos. Así, paralelamente a los robots autónomos y a los robots manipuladores generalmente fijados en un lugar específico de una fábrica, cada vez hay más robots móviles capaces de llevar a cabo una misión específica en un lugar o ubicación determinados. Como puede verse, los robots móviles pueden adoptar muchas formas y utilizarse en muchas aplicaciones. En este trabajo de integración curricular, se utiliza un robot móvil de accionamiento direccional, diseñado para realizar tareas autónomas en un entorno preestablecido. De tal manera, que se presenta la “Implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación”. En el capítulo 1, se describe las generalidades del trabajo de integración curricular. En el capítulo 2, se presenta los fundamentos teóricos de los sistemas de control y de la cinemática de un robot móvil. En el capítulo 3, se presenta la aportación práctica del controlador PID en un robot móvil autónomo.

**Palabras claves: ROBÓTICA, CONTROLADORES, PROPORCIONAL, INTEGRAL, CINEMÁTICA, SIMULACIÓN.**

# Capítulo 1

## Generalidades del trabajo

### 1.1. Introducción.

Los controladores proporcionales integrales y derivados (PID) se utilizan ampliamente en la industria debido a su estructura simple y su robustez. En la literatura abierta existen varios métodos para el diseño de controladores proporcionales integrales (PI) / PID para la integración de sistemas. (Demirtas & Karaoglan, 2012)

Los métodos tradicionales de sintonización de controladores PID se dividen en tres categorías: métodos de sintonización basados en fórmulas, en reglas y en optimización. Para sintonizar los parámetros de control PID se han desarrollado varios métodos experimentales, como el de Ziegler-Nichols y el de Cohen-Coon, y la mayoría se han aplicado a sistemas reales. (Aldemir & Anwer, 2020)

En la práctica de la ingeniería electrónica es frecuente encontrar procesos con polos en el origen (sistemas integradores) y retardos temporales. El control de estos procesos es difícil si se compara con el control de los procesos que tienen polos en el semiplano izquierdo del eje imaginario (sistemas estables). Los procesos integradores incluyen reactores continuos de tanque mixto, control de nivel, bucle de control de composición en columna de destilación, tambor de vapor de caldera, entre otras aplicaciones. (Anil & Sree, 2014)

### 1.2. Antecedentes.

La tecnología de la robótica móvil tiene amplias perspectivas de aplicación, no sólo juega un papel cada vez más importante en el campo de la exploración de la ciencia, también las aplicaciones industriales en el campo militar, la precisión de control de movimiento del robot inteligente también es cada vez mayor. En el caso del control de robots móviles, se utiliza como método de control el algoritmo de control PID, el mismo que tiene una estructura simple y ajuste de parámetros muy sencillo. Por ejemplo,

Moshayedi et al., (2019) propuso la “planificación y seguimiento de trayectorias de un robot móvil utilizando algoritmos de optimización basados en control PID. Este se aplica sobre un modelo dinámico de un robot móvil de dos ruedas (acción diferencial). En la parte experimental se implementó un robot móvil de dos ruedas para movilizarse en diversos entornos y con obstáculos.

### **1.3. Definición del Problema.**

La planificación de trayectorias y el seguimiento de trayectorias son la tarea fundamental en la ciencia de la robótica móvil, y permiten que el robot navegue de forma autónoma. Por este motivo, surge la necesidad de la implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación

### **1.4. Justificación del Problema.**

La mayoría de los investigadores han proyectado un enfoque experimental de sintonización del PID basado en el enfoque de prueba y error y en los enfoques de la curva de respuesta del procedimiento. Estos métodos consumen mucho tiempo y son costosos, mientras que la optimización mediante el establecimiento de un modelo matemático que tenga en cuenta el mecanismo de control específico es conveniente y eficiente.

### **1.5. Objetivos del Problema de Investigación.**

#### **1.5.1. Objetivo General.**

Realizar la implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación.

#### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

- Describir los fundamentos teóricos de los sistemas de control y de la movilidad de la cinemática en robots móviles de acción diferencial.
- Diseñar los escenarios de simulación de los controladores PID que permitan al robot móvil evitar obstáculos.
- Analizar los resultados obtenidos de los dos escenarios de simulación utilizando el entorno Simiam.



## **1.6. Hipótesis.**

Este trabajo propone un algoritmo de control PID para la trayectoria del robot móvil y evitar chocar con obstáculos. Es el sistema experto y el controlador PID combina el uso de error de posición del robot móvil y la tasa de error de cambio de salida para corregir los parámetros PID. Con esta explicación se pretende demostrar la optimización y eficacia del controlador PID.

## **1.7. Metodología de Investigación.**

Diferentes investigadores han propuesto varias definiciones de la investigación. Se define como una "exploración sistemática destinada a conocer nuevos conocimientos, para obtener información adicional". Saunders, Lewis y Thornhill (2003) definen la investigación como "algo que la gente emprende para averiguar nuevas cosas de forma sistemática, aumentando así sus conocimientos".

De las definiciones de investigación expuestas anteriormente se deduce que la investigación es una actividad planificada, cuyo objetivo es establecer nuevos hechos e información sobre un fenómeno concreto. El proceso de investigación implica la identificación de un problema particular o un área de interés que se traduce en un problema de investigación, la recopilación de datos, el análisis de los datos y la presentación de los resultados de la investigación.

## Capítulo 2

### Fundamentación teórica

#### 2.1. Introducción de los sistemas de control.

Con los sistemas de control de bucle cerrado, el objetivo es restablecer el valor del error. El valor obtenido del sistema diseñado se reintegra en el sistema como retroalimentación. Los sistemas de control de bucle cerrado incluyen controladores On-Off, controladores P, controladores PI, controladores PID.

#### 2.2. Controlador ON-OFF.

El control ON-OFF es el más sencillo de los sistemas de control en bucle cerrado que se encuentran publicados. Si el valor de entrada es inferior al valor esperado, el sistema sale. La salida se desactiva cuando el valor de entrada alcanza el valor esperado. La figura 2.1 muestra el diagrama de bloques y gráfica del sistema de control de lazo cerrado ON-OFF.

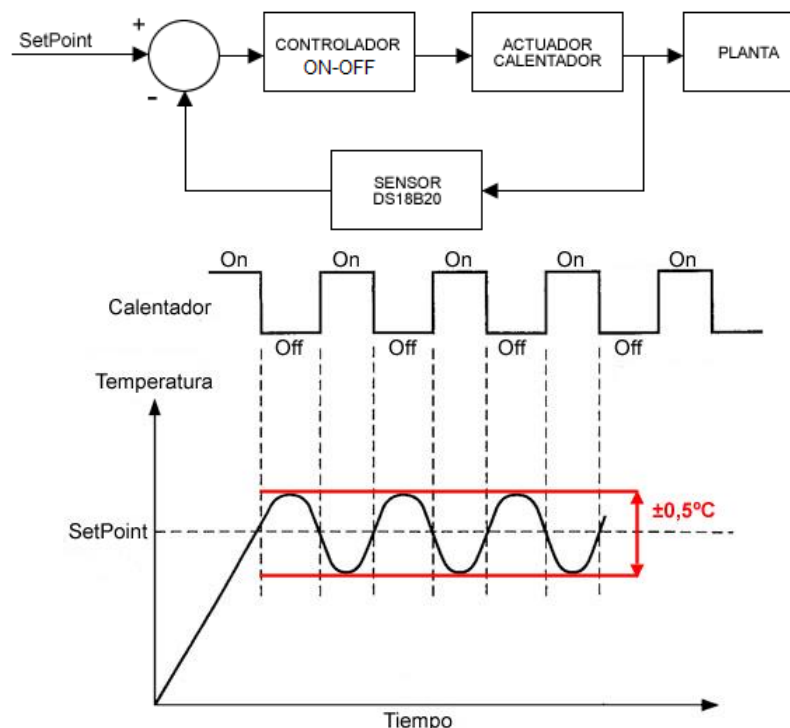


Figura 2. 1: Representación de bloques y gráfica del control ON-OFF con histéresis.  
Fuente: (Martínez M., 2017)

Los actuadores que funcionan en este tipo de controladores tienen una vida útil corta porque se abren y cierran con frecuencia. La histéresis se

incluye en los controladores On-Off para prolongar su vida útil. Con la histéresis, cuando el valor de entrada alcanza el valor deseado, la salida se apaga. Cuando el valor de entrada cae por debajo de la banda de histéresis deseada, la salida se abre y el sistema se activa de nuevo. De este modo se ha creado un sistema que evita el encendido y apagado frecuente del actuador.

En los reguladores On-Off, el valor de entrada nunca puede permanecer constante en el valor deseado, sino que fluctúa por encima y por debajo del valor esperado. Los controladores On-Off son un tipo de control sencillo y económico. Debido a estas características, su uso está muy extendido. Se utiliza sobre todo en sistemas industriales como frigoríficos, planchas o calentadores de agua en la vida cotidiana.

### 2.3. Controlador P.

En el sistema de control P (proporcional), se concentra en evitar grandes oscilaciones en el sistema de control On-Off. Se basa en la reducción proporcional de las oscilaciones del sistema a medida que el valor de entrada se acerca al valor deseado. El diagrama del sistema de controladores P (proporcionales) se muestra en la figura 2.2.

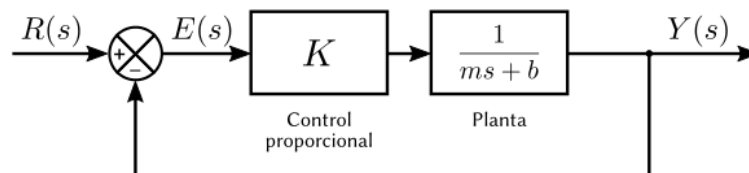


Figura 2. 2: Representación de bloques del controlador P.  
Fuente: (Cano, 2013)

El sistema de control P presenta un rango de amplitud proporcional definido en la parte superior e inferior de la consigna, tal como se muestra en la figura 2.3. La banda de amplitud proporcional suele expresarse como un porcentaje del valor deseado. Cuando el valor de entrada entra en la banda proporcional, a medida que se aproxima al valor deseado, se reducen las oscilaciones y se proporciona para acercarse al valor deseado con excesos decrecientes. En este tipo de control, el valor de entrada y el valor deseado

nunca se superponen. Esta es la desventaja del sistema de control de tipo P en sí mismo.

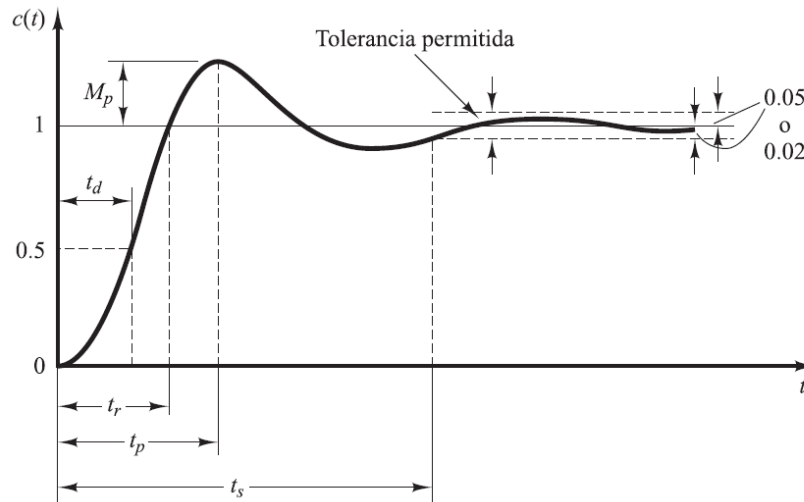


Figura 2. 3: Representación de bloques y gráfica del controlador P.

Fuente: (Castaño G., 2019)

#### 2.4. Controlador PI.

Demirtas & Karaoglan, (2012) indican que el sistema de control PI es un sistema de control proporcional-integral diseñado para llevar el valor de entrada, que no puede ajustarse al valor deseado. Para ello, los errores que se producen en el sistema se añaden a la salida mediante el controlador integrador. El diagrama del sistema de control PI se muestra en la figura 2.4.

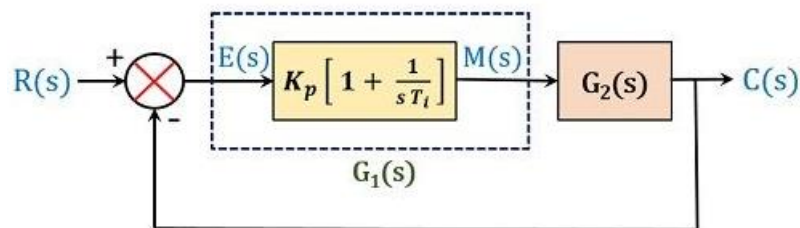


Figura 2. 4: Representación de bloques y gráfica del controlador PI.

Elaborado por: Autor.

En el controlador PI, el valor del proceso se asienta finalmente en el valor de consigna y el error se restablece. En este sistema de control, al principio se producen sobreimpulsos muy elevados y el tiempo de estabilización es muy largo. Esta es la desventaja del sistema de control de tipo PI en sí mismo. (Kadu et al., 2019)

## 2.5. Controlador PID.

En el tipo de controladores PID, se pretende que el valor de entrada alcance el valor deseado en poco tiempo y con el menor rebasamiento posible. Para conseguirlo, se deben encontrar los coeficientes P, I y D más adecuados para el sistema diseñado. Para determinar estos coeficientes se pueden utilizar modelos o resultados experimentales. El diagrama del sistema de control proporcional, integral y derivativo se muestra en la figura 2.5.

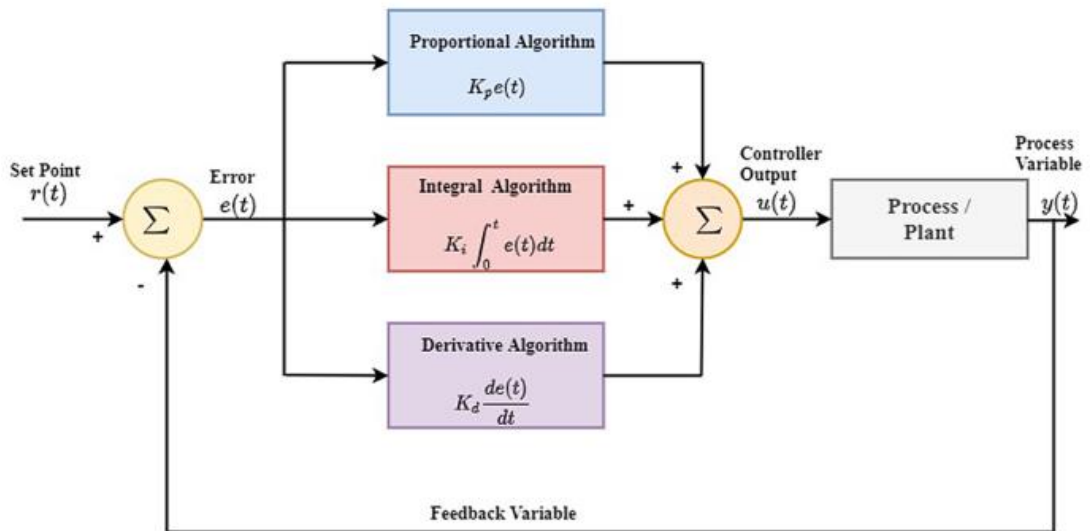


Figura 2. 5: Representación del controlador PID.

Fuente: (Castaño G., 2019)

Los controladores PID son reguladores híbridos donde se combinan los puntos fuertes que tienen los circuitos proporcional, integral y derivativo en un solo controlador. Los parámetros que componen los controladores PID se gestionan con los valores de los coeficientes. Estos coeficientes  $K_p, K_i, K_d$  se expresan con diferentes valores en cada uno de los sistemas desarrollados en el capítulo 3.

Como se indica en esta estructura de controlador (véase la figura 2.5), la estructura interna de un controlador PID consiste en controladores de ganancia proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). El controlador P (proporcional) se comporta como función de error, el controlador I (integral) se comporta como función de acumulación de error y el controlador D (diferencial) como función de variación del error. La salida del controlador PID o la ley de control se define como,

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

En esta ecuación,  $e(t)$  representa el valor de error e  $y(t)$  el valor de salida. El valor del error se calcula según,

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

El controlador integral del receptor se utiliza para restablecer el error en el sistema diseñado. El controlador derivado se utiliza para aumentar la velocidad de respuesta de la estabilidad del sistema diseñado, estabilizando así el sistema en un tiempo más corto.

Para que el sistema diseñado conserve el valor deseado, es necesario que se comparen el valor del proceso y el valor establecido. Los sistemas de control de bucle cerrado se utilizan para conseguir este resultado deseado. En el sistema diseñado con sistemas de control de lazo cerrado se toma un valor de medición y se compara con el valor esperado. La diferencia obtenida representa el valor de error del sistema.

Los coeficientes que componen el controlador PID pueden ser diferentes para cada sistema. La razón principal de esta diferencia es el sistema en el que se aplicará el controlador o el entorno en el que se utilizará. Por lo tanto, el diseño del controlador PID es más complejo que el de otros controladores. Los controladores PID deben ser rediseñados para cada sistema. Esto aumenta el coste de la creación del sistema.

## **2.6. Medidas de rendimiento del paso unitario PID**

Los controladores de lazo cerrado se centran generalmente en cuatro criterios clave de rendimiento para evaluar la respuesta de paso unitario de los sistemas. Estos criterios de rendimiento son el tiempo de subida, el rebasamiento máximo, el tiempo de asentamiento y los parámetros de error de paso unitario. Estos parámetros se muestran en la figura 2.6.

La parte de la respuesta del sistema que llega a cero con el tiempo se define como transitorio. En un sistema de control, la amplitud y la duración de la respuesta transitoria deben mantenerse por debajo de un límite soportable. En los sistemas de control lineal, la evaluación de la respuesta transitoria se suele hacer utilizando la respuesta de paso unitario  $u(t)$ . La respuesta del sistema de control a la entrada de paso unitario se denomina respuesta de paso unitario.

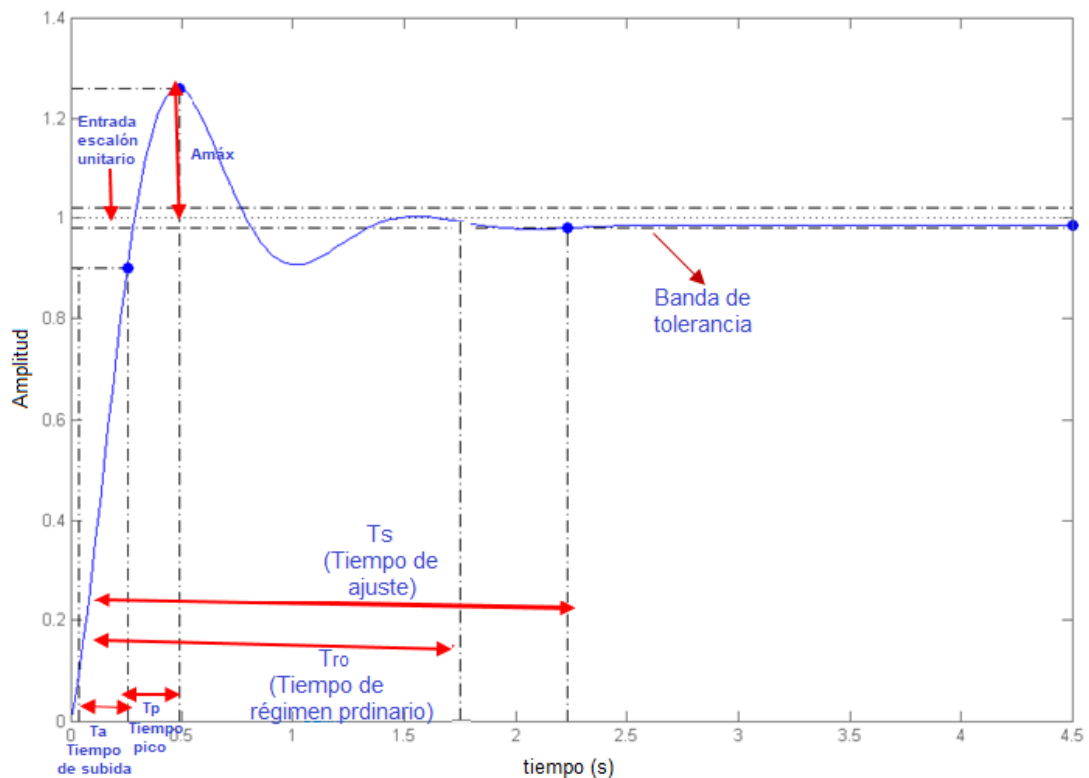


Figura 2. 6: Diagrama de bloques del sistema de control PID.

Fuente: (Castaño G., 2019)

### 2.6.1. Criterio de rendimiento de sobreimpulso máximo:

Los controladores diseñados miden la cantidad máxima de sobreimpulso en las oscilaciones antes de que el valor de salida del sistema alcance el valor deseado. En los sistemas de control, es deseable que el mayor rebasamiento sea inferior al 20%. Sin embargo, en las aplicaciones críticas del control en las que no se puede tolerar el rebasamiento, es deseable tener un rebasamiento lo más pequeño posible.

Si la respuesta de paso unitario ( $y(t)$ ,  $t$ ) de un sistema de control se muestrea con un período de muestreo, denote  $y(n) = y(n t)$  en el dominio discreto. El máximo rebasamiento de la respuesta unitaria puede expresarse mediante,

$$A_{m\acute{a}x} = \acute{m}ax[y(n)] - 1, \quad n = 1, 2, 3, \dots, n_s$$

### 2.6.2. Criterio de tiempo de ajuste:

Mide el tiempo que transcurre hasta que el valor de salida del sistema supervisor dise\u00f1ado alcanza el valor deseado. En las aplicaciones de control, la amplitud de asentamiento para el mayor rebasamiento se acepta generalmente como  $\pm 5\%$ , es decir,  $105\%-95\%$ . El tiempo de asentamiento debe elegirse peque\u00f1o en los sistemas que deben responder r\u00e1pidamente. El tiempo de asentamiento para la respuesta del paso unitario puede expresarse mediante,

$$T_y = (n_s - n_2)\Delta t$$

$$0.95 \leq y(n) \leq 1.05$$

$$n \geq n_2$$

### 2.6.3. Criterio de tiempo de subida:

Mide el tiempo que transcurre hasta que el valor de salida del sistema supervisor dise\u00f1ado alcanza entre el  $10\%$  y el  $90\%$  del valor deseado [38], [39]. El tiempo de subida se utiliza para medir la adaptabilidad de la respuesta del sistema dise\u00f1ado a los cambios r\u00e1pidos del sistema [36]. Este valor debe elegirse peque\u00f1o para poder seguir las se\u00f1ales de los sistemas de control que cambian constantemente. El tiempo de subida para la respuesta del paso unitario puede ser expresado por,

$$T_r = (n_u - n_d)\Delta t$$

$$0.90 \leq y(n_u)$$

$$0.10 \leq y(n_d)$$

### 2.6.4. Criterio de error cuadr\u00e1tico medio de la respuesta al escal\u00f3n unitario:

Es el criterio de error que muestra cu\u00e1nto cambia la salida del sistema de controladores dise\u00f1ados a la funci\u00f3n de paso unitario. El criterio de error



cuadrático es ampliamente utilizado en problemas de optimización [36]. El criterio de error cuadrático medio trata de ser minimizado en las optimizaciones que se intentan hacer sobre los controladores. Este valor, que se intenta minimizar, es el mínimo cero. Indica que el valor de salida del sistema de controladores diseñado para alcanzar el criterio de error cuadrático cero es la respuesta unitaria ideal. Sin embargo, alcanzar este resultado, que existe en teoría, resulta imposible en la práctica debido a los retrasos que se producen en el sistema diseñado. La supervisión de los sistemas de controladores que cambian continuamente podría lograrse minimizando el error cuadrático medio.

El error medio cuadrático puede expresarse mediante,

$$E_2 = \frac{1}{n_x} \sum_{n=0}^{n_x} [y(n) - r(n)]^2$$

## **2.7. Problemas básicos en el diseño del sistema de control.**

Es conveniente establecer ciertas comparaciones de los sistemas de control con relación a la gestión de proyectos. Esta gestión de proyectos se basa principalmente en el control de bucle cerrado. Los procesos de control en bucle cerrado permiten garantizar el funcionamiento del sistema respetando las condiciones de control. Para el control en bucle cerrado, se retroalimenta la salida del sistema para modificar las entradas de este.

En este sentido, el funcionamiento de un termostato junto con la calefacción que controla la temperatura de la habitación representa una forma de control en bucle cerrado. Los controles de bucle cerrado se basan principalmente en la fijación de parámetros específicos (por ejemplo, la temperatura ambiente deseada), así como en la medición de las condiciones del sistema en relación con ese parámetro (por ejemplo, la diferencia que existe entre la temperatura ambiente actual y la deseada), así como en un método de ajuste de los parámetros del sistema que corrija esta diferencia y permita alcanzar el parámetro deseado (por ejemplo, encendiendo o apagando la caldera).

Los atributos de los sistemas de control y gestión de proyectos están presentados en la tabla 2.1. Si bien no todas las características del sistema de control aparecen entre los sistemas clásicos para la gestión de proyectos. Además, al gestionar los proyectos, se trata más bien de sistemas de control adaptativo de bucle cerrado.

Tabla 2. 1: Características principales del control y la gestión de los proyectos.

	<b>Control de Procesos</b>	<b>Gestión de Proyectos</b>
Procesos	Una operación o un marcador de desarrollo natural y progresivamente continuo por una serie de cambios graduales que se suceden de una manera relativamente fija y conducen a un resultado particular.	Un conjunto de actividades paso a paso necesarias para producir el Salir. Suele realizarse de forma lineal en métodos tradicionales y de forma incremental e iterativa en métodos ágiles.
Sistemas	Una combinación de componentes que actúan juntos y cumplen un determinado objetivo.	Los sistemas de proyectos y productos se separan en métodos tradicionales y ágiles.
Perturbaciones	Una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema.	Un resultado de desempeño que no cumple con las expectativas. Ya sea costo, cronograma o déficit de rendimiento técnico
Control de retroalimentación	Una operación en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y la entrada de referencia.	Retroalimentación de la dirección del proyecto sobre costos, cronograma y desempeño técnico en enfoques maduros. Por lo general, solo el costo y el horario son menos maduros.
Amortiguación	La amortiguación es una influencia dentro o sobre un sistema oscilatorio que tiene el efecto de reducir, restringir o prevenir sus oscilaciones.	Los puntos de control diseñados para evitar perseguirnos cuando los entregables del proyecto no cumplen con las expectativas y se aplican soluciones urgentes que crean más oscilaciones en el flujo del proceso.

Elaborado por: Autor.

## 2.8. Descripción del modelo cinemático de un robot móvil.

En los últimos años, ha habido un interés considerable en el área de la robótica móvil y las tecnologías educativas. Para los ingenieros e investigadores de control, existe una gran cantidad de literatura que trata del control de los robots móviles con ruedas (WMR) y sus aplicaciones. Sin

embargo, mientras que el tema del modelado cinemático de los WMR está bien documentado y es fácilmente comprensible para los estudiantes.

En el caso de un robot móvil de accionamiento diferencial (DDMR), por ejemplo, no hay textos disponibles que investigue a fondo el enfoque de modelado dinámico teniendo en cuenta determinadas restricciones. La información se encuentra disponible principalmente en revistas, documentos de conferencias e informes técnicos. Además, el material difiere de un artículo a otro, con diferentes variables y marcos de referencia utilizados, y diversos supuestos. Además, algunos artículos presentan resultados diferentes para el mismo DDMR, lo que aumenta la confusión del modelado dinámico.

La figura 2.7 (a) muestra el robot móvil de acción diferencial y la figura 2.7 (b) muestra al mismo con sus respectivas coordenadas cartesianas para el modelo matemático de la cinemática del robot.

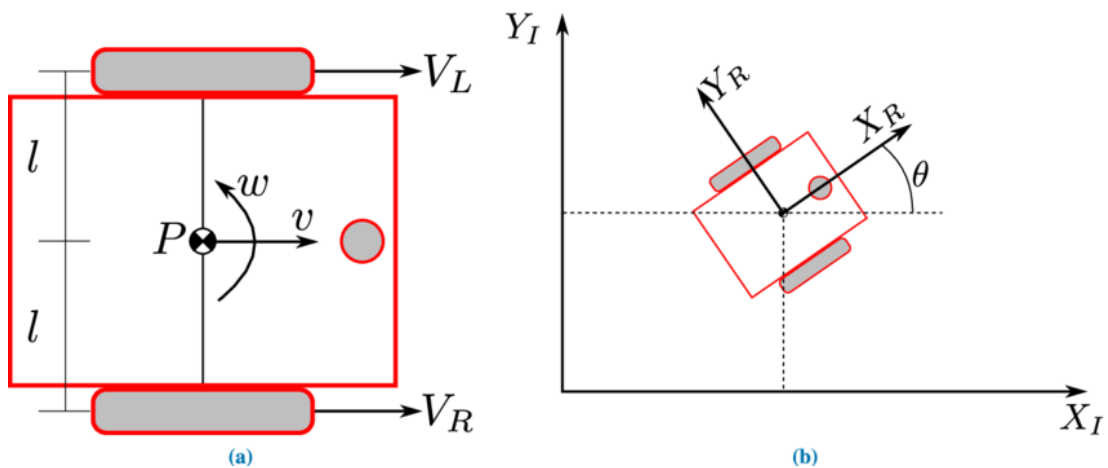


Figura 2. 7: (a) Robot de accionamiento diferencial ideal, y (b) Coordenadas relativas y globales.

Fuente: (Carvalho Filho et al., 2019)

Los escenarios definidos se muestran en la figura 2.7. El origen del marco del robot se define como el punto medio  $P$  del eje entre las ruedas. Se supone que el centro de masa del robot está en el eje de simetría, a una distancia del origen  $A$ . De la figura 2.7, la posición y orientación del robot en el marco inercial pueden definirse como,

$$q^I = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ \theta \end{bmatrix}$$

La cuestión importante que hay que explicar en esta fase es el mapeo entre estos dos entornos. La posición de cualquier punto del robot puede definirse en el entorno del robot y en el entorno inercial de la siguiente manera. Sea,  $X^r$  y  $X^I$  las coordenadas del punto dado en el marco referencial del robot y en el marco inercial, respectivamente.

$$X^r = \begin{bmatrix} x^r \\ y^r \\ \theta^r \end{bmatrix}$$

$$X^I = \begin{bmatrix} x^I \\ y^I \\ \theta^I \end{bmatrix}$$

El modelado cinemático es el estudio del movimiento de los sistemas mecánicos sin considerar las fuerzas que afectan al movimiento. En el caso del DDMR, el objetivo principal del modelado cinemático es representar las velocidades del robot en función de las velocidades de las ruedas motrices junto con los parámetros geométricos del robot. La velocidad lineal de cada una de las ruedas motrices en la estructura del robot es, por tanto, la velocidad lineal del robot móvil es la media de las velocidades lineales de las dos ruedas definida por,

$$v = \frac{V_R + V_L}{2} = \frac{R\varphi_R + R\varphi_L}{2} = \frac{R(\varphi_R + \varphi_L)}{2}$$

$$\omega = \frac{V_R - V_L}{2L} = \frac{R\varphi_R - R\varphi_L}{2} = \frac{R(\varphi_R - \varphi_L)}{2}$$

## Capítulo 3

### Diseño, simulación y análisis de resultados

En este capítulo se desarrolla la implementación del controlador PID en robots móviles utilizando entorno de simulación.

#### 3.1. Descripción del entorno de simulación.

Simiam es un simulador de robótica para aprender cómo se aplican los controladores a los robots móviles autónomos. Proporciona una biblioteca de diseños de controladores centrados en reducir la brecha entre la teoría y la práctica. Este robot móvil es una plataforma móvil impulsada de forma diferencial con sensores infrarrojos (IR) de detección de distancia y con encoders (codificadores) integrados en las ruedas.

El simulador permite utilizar los sensores IR y los codificadores de rueda como retroalimentación en las unidades de control y controlar las ruedas izquierda y derecha del robot con las señales de entrada del robot móvil. La principal característica del simulador es que permite diseñar e implementar controladores en el entorno de simulación MatLab, probarlos en simulación y luego ejecutarlos en un robot real sin necesidad de implementar código fuera del entorno MatLab.

La base del trabajo de integración curricular es la aplicación de simulación de robots móviles, que se ha realizado utilizando controladores basados en el controlador proporcional-integral-derivativo (PID) en la literatura. En este trabajo, la atención se centra en el modelado de los comportamientos de orientación y evitación de obstáculos del robot en el software Simiam. En la práctica, el robot móvil que utiliza el controlador PID podrá evitar los obstáculos y alcanzar el objetivo.

Simiam es un simulador de robots móviles de código abierto para MatLab/Simulink que facilita la implementación y el diseño de controladores y algoritmos aplicables tanto a robots móviles simulados como reales. La figura 3.1 muestra la aplicación en un entorno desordenado.

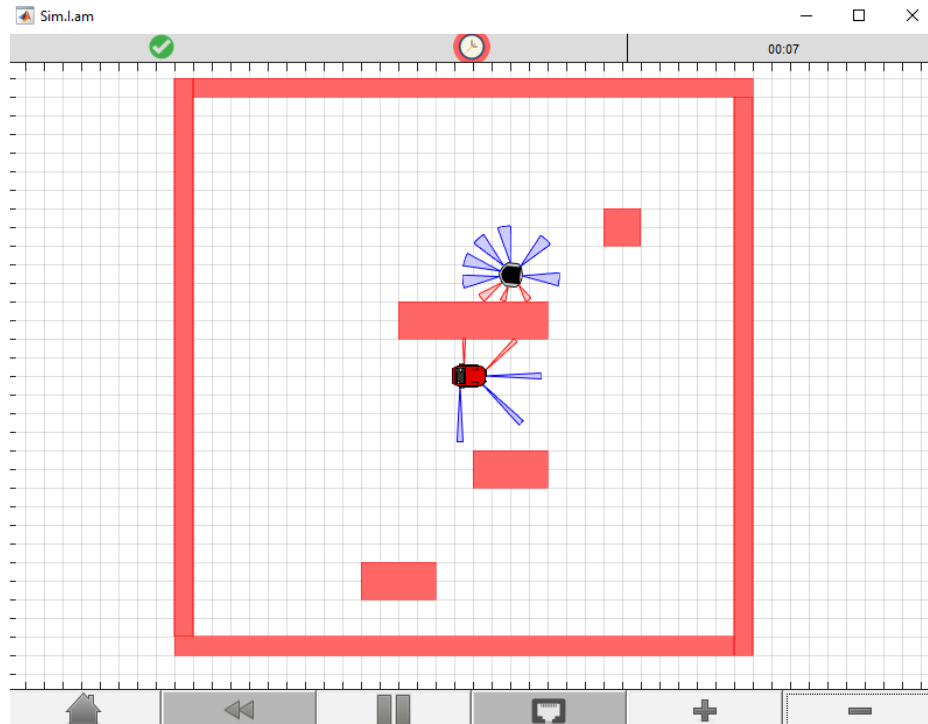


Figura 3. 1: Entorno de simulación Simiam para MatLab/Simulink.

Fuente: (Seth, 2017)

### 3.2. Descripción de la simulación del robot móvil.

El robot móvil simulado en el entorno de Simiam se fundamenta en tres patrones de movimiento: (1) avanzar hacia la meta, (2) avanzar hacia la meta evitando obstáculos y (3) evitando únicamente obstáculos. Para determinar estos patrones de actuación se emplean las distancias entre el robot y los obstáculos ( $d_{ro}$ ) que miden los sensores IR.

Si  $d_{ro} > 25 \text{ cm}$ , el robot móvil se mueve hacia el objetivo. Hay que considerar que el diámetro del cuerpo del robot es aproximadamente 2 veces la distancia entre el obstáculo y el robot. Por lo tanto, el robot no adopta ningún comportamiento de evitación de obstáculos. Si  $10 \text{ cm} < d_{ro} < 25 \text{ cm}$ , evitará los obstáculos y se moverá hacia el objetivo. Si  $d_{ro} \leq 10 \text{ cm}$ , el robot sólo se centra en evitar el obstáculo. Porque la distancia entre el robot y el obstáculo es menor que el diámetro del robot. Para que el robot no choque con el obstáculo, se espera que sólo tienda a evitarlo. En la figura 3.2 se muestra el diagrama ASM del patrón durante el movimiento del robot móvil.

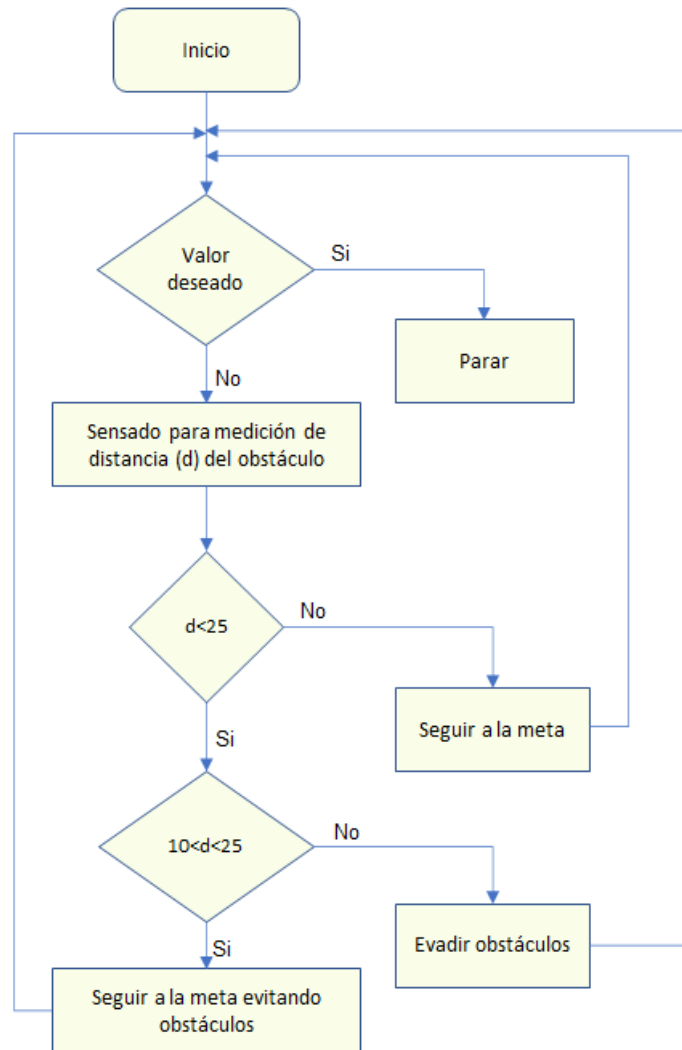


Figura 3. 2: Diagrama ASM del patrón de movimiento del robot móvil.  
Elaborado por: Autor.

### 3.3. Aplicación del controlador PID.

Casi todos los controladores se utilizan en los sistemas industriales con algoritmos PID o PID modificados. Los controladores PID son los preferidos en la industria moderna por las ventajas de ser aplicables a los sistemas de regulación. Según la bibliografía, se han empleado en los estudios sobre robots diversos algoritmos para que los robots móviles eviten los obstáculos y lleguen a su destino. Los algoritmos son un componente fundamental en la tarea de control de los robots.

Los parámetros o coeficientes del controlador PID ( $K_p, K_i, K_d$ ) permiten determinar la eficacia del robot móvil para alcanzar su objetivo al evitar los obstáculos que se presentan durante la ejecución del robot móvil con el

controlador PID. Está comprobado que mientras más precisos sean estos coeficientes, mayor será el éxito del robot para alcanzar el objetivo.

Este estudio se centra en la librería del simulador Simiam, que ha sido desarrollada con controladores basados en PID. La optimización del sistema de control PID se ha realizado optimizando los coeficientes de los controladores utilizados en el entorno de simulación. Una vez realizadas las optimizaciones, se ha actualizado el robot utilizado en el entorno de simulación de acuerdo con las características físicas del robot laberinto que utiliza sensores para evitar obstáculos.

### **3.3.1. Cálculo de los parámetros PID y diseño de los controladores**

La determinación de los parámetros o coeficientes  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$  ha sido una cuestión muy importante en el diseño de los controladores PID. Estos parámetros forman la respuesta al escalón del sistema. La configuración o asignación correcta de los coeficientes aumentará la eficiencia del controlador diseñado.

Mientras, que coeficientes incorrectamente configurados afectan la respuesta al escalón negativamente y aumentan el tiempo de establecimiento o ajuste. Esto significa que se ha diseñado un controlador fallido. Al determinar los parámetros PID, el valor  $K_p$  se modifica para los cambios de tiempo de subida, el valor  $K_i$  se modifica para eliminar la falla del sistema diseñado, y el valor  $K_d$  se modifica para regular los sobrepasos.

Los efectos de los reguladores que componen el sistema ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) en los controladores de bucle cerrado se resumen en la tabla 3.1. Si estos coeficientes no se ajustan de forma equilibrada, no se pueden aprovechar las características superiores del controlador PID. Los controladores PID se diseñan para mostrar los efectos de la variación de los coeficientes P, I, D en la respuesta al escalón.

Se consideraron los efectos independientes de los parámetros indicados en la tabla 3.1 para determinar los coeficientes en los controladores



diseñados. Las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 muestran las respuestas al escalón del controlador PID configurado con diferentes parámetros P, I, D. En la figura 3.3, se diseña un controlador PID basado en los parámetros  $K_p=1$ ,  $K_i=0$ ,  $K_d=0$ . Este es un conjunto de controladores bastante simple. Aquí, mientras que el tiempo de ajuste del sistema fue de 4.6 s, el tiempo de subida fue de 2.6 s. La respuesta al escalón se mantuvo en 0.5 s. Dado que la respuesta al escalón no puede excederse de 1 en ningún lugar, se ha observado que no hay sobreimpulso en el sistema.

Tabla 3. 1: Efectos independientes de los parámetros en el controlador PID

Tipo de controlador	Respuesta en bucle cerrado	Tiempo de subida	Exceso	Tiempo de ajuste	Error de régimen continuo
Proporcional	$K_p$	Decrece	Aumenta	Aumenta ligeramente	Disminuye
Integral	$K_i$	Decrece ligeramente	Aumenta	Aumenta	Disminución significativa
Derivativo	$K_d$	Varia ligeramente	Disminuye	Disminuye	Variación insignificante

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.4 se muestra la respuesta al escalón del controlador PID basado en los coeficientes  $K_p=9$ ,  $K_i=0$ ,  $K_d=0$ . Este controlador tiene más éxito que el diseñado previamente. Mientras que el tiempo de subida disminuye, se asegura que éste disminuya durante el tiempo de ajuste. La respuesta al escalón en el tiempo de ajuste fue de 0.9 s. Con este tipo de control, el exceso fue del 18%.

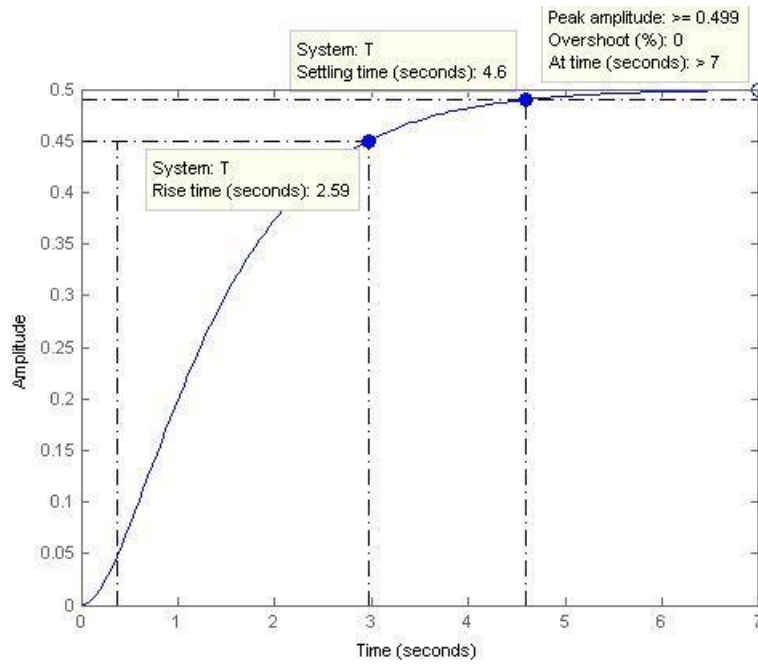


Figura 3. 3: Respuesta al escalón del controlador PID para los coeficientes  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0$  y  $K_d = 0$ .  
Elaborado por: Autor.

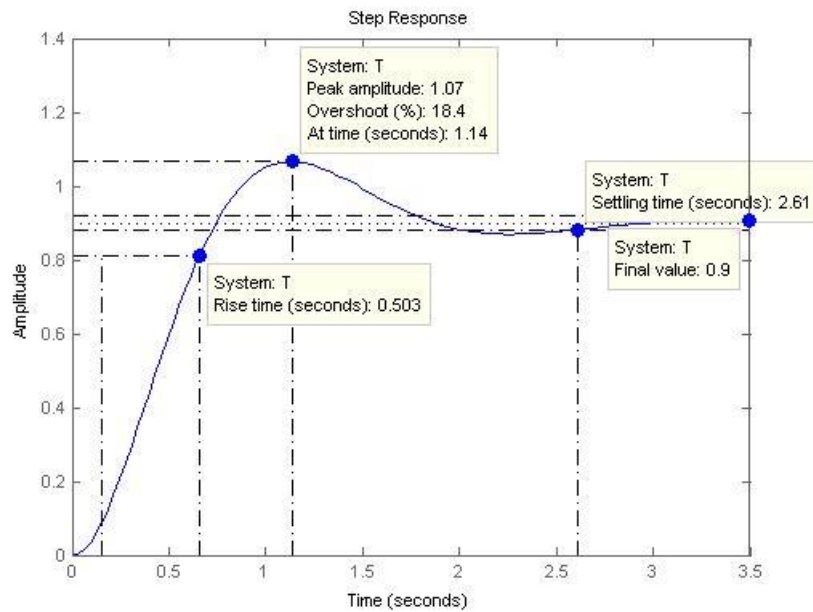


Figura 3. 4: Respuesta al escalón del controlador PID para los coeficientes  $K_p = 9$ ,  $K_i = 0$  y  $K_d = 0$ .  
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.5 se presenta la respuesta al escalón que corresponde al diseño del controlador para los coeficientes  $K_p=40$ ,  $K_i=3$ ,  $K_d=2$ . Se creó un controlador más eficiente que los otros dos propuestos previamente. Mientras que el tiempo de ajuste se mantuvo en 2.2 s, el mayor sobreimpulso fue del

26%. Además, el tiempo de ajuste ha disminuido y se ha asegurado que el valor de posición de la unidad sea 1. El sistema se estabilizó en poco tiempo con este tipo de controlador diseñado. De este modo, los controladores PID se han optimizado con éxito con estos parámetros.

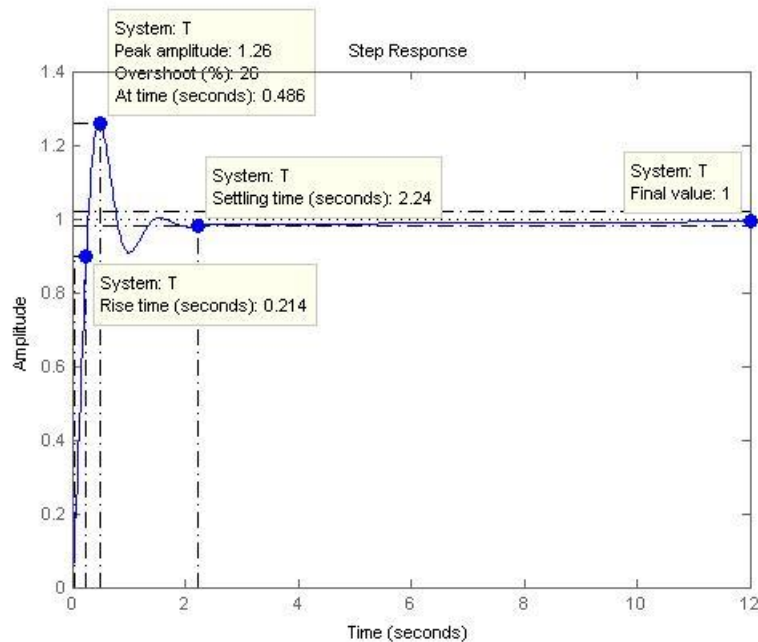


Figura 3. 5: Respuesta al escalón del controlador PID para los coeficientes  $K_p = 40$ ,  $K_i = 3$  y  $K_d = 2$ .  
Elaborado por: Autor.

En las figuras 3.6 y 3.7, se muestran conjuntamente la respuesta al escalón de un sistema de control sin ningún controlador y de un sistema de control de bucle cerrado con retroalimentación usando controlador PID ( $K_p = 40$ ,  $K_i = 3$ ,  $K_d = 2$ ). La respuesta al escalón del sistema sin controladores se muestra con una línea azul. La respuesta al escalón del sistema basado en controladores PID se muestra con la línea verde.

El controlador del sistema está calculado mediante la función de transferencia en tiempo continuo del sistema no utilizado (el sistema azul):

$$H = \frac{1}{s^2 + 3s + 1}$$

El valor de los controladores PID de tiempo continuo del sistema diseñado en forma paralela se calcula con,

$$C_{PID} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$$

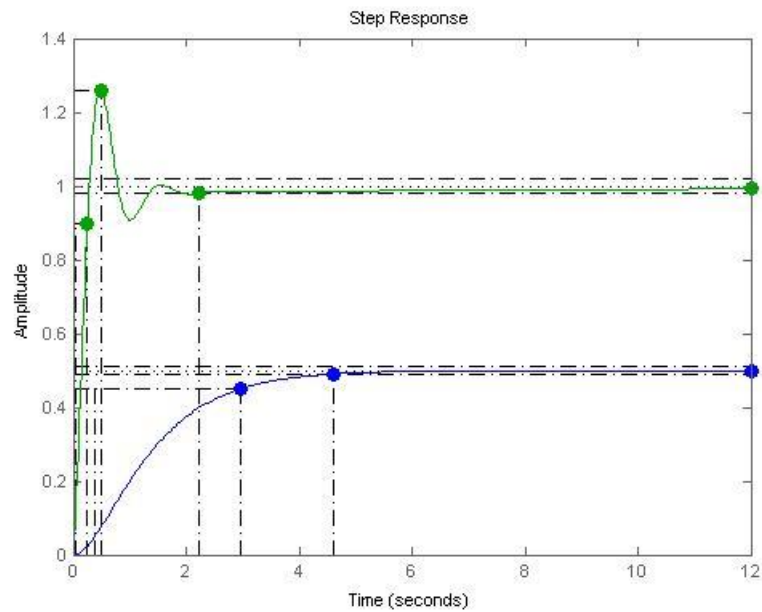


Figura 3. 6: Respuestas al escalón del sistema sin controlador (azul) y controlado por PID (verde).  
Elaborado por: Autor.

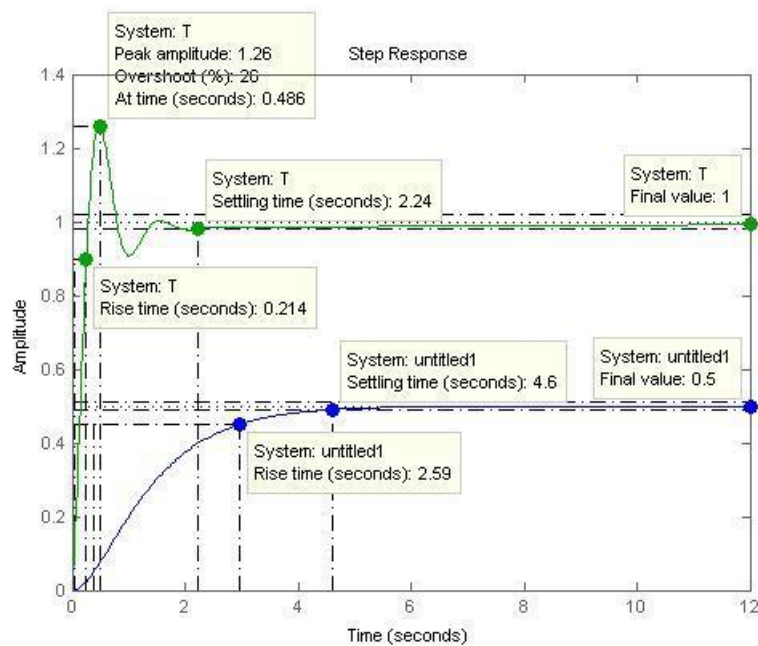


Figura 3. 7: Gráficas de la respuesta en frecuencia (Hz) para estimación no paramétrica utilizando SIT.  
Elaborado por: Autor.

Si bien el tiempo de subida del sistema sin controlador (línea azul) fue de 2.59 s, se ha observado que para el sistema con controlador (línea verde)

fue de 0.21 s. En tanto que el sistema sin controlador (línea azul) se estabiliza en 4.6 s, se ha observado que para el sistema con controlador (línea verde) fue de 2.24 s. Aunque la respuesta al escalón se mantuvo en 0.5 en el sistema sin controlador, este valor alcanzó a 1 en el sistema con controlador PID. Se observa en la figura 3.7 que el controlador basado en PID obtenido con el método propuesto tuvo un mejor desempeño que el controlador que no utilizó ningún controlador.

A continuación, se empleará el siguiente algoritmo para el controlador PID del robot móvil autónomo:

- Los coeficientes  $K_p = 10$ ,  $K_i = 10.01$ ,  $K_d = 10.01$  se utilizaron como condiciones iniciales.
- El valor de  $K_p$  se reduce a 1 en intervalos de 1 ms hasta que el valor real sea el 99% del valor de referencia.
- Si el valor de  $K_i$  es inferior al 99% del valor real o está entre el 99% y el 101% del valor real, el valor de  $K_i$  se reduce a 1 en intervalos de 1 ms.
- Si el valor  $K_d$  está entre el 99% y el 99,5% de la velocidad de referencia, el valor  $K_d$  se reduce a 1 en intervalos de 1 ms.

Para proporcionar las condiciones esperadas en situaciones críticas, los valores de reducción se hicieron para 0.1 o 0.01 en lugar de 1, aumentando la sensibilidad y determinando los coeficientes adecuados. Los coeficientes PID determinados pueden ser mejorados para obtener coeficientes P, I, D más optimizados.

Los controladores diseñados con estos coeficientes afectan directamente al éxito del sistema. En los robots móviles, este éxito viene determinado por el rendimiento de alcanzar el objetivo en el camino y tiempo más cortos evitando los obstáculos del entorno. La tabla 3.2 muestra diferentes coeficientes PID y resultados en diferentes entornos para el robot móvil.

Tabla 3. 2: Resumen de los datos obtenidos con los parámetros del controlador PID.

Entrada escalón (s)	Nivel de sobreimpulso (s)	% de exceso	Kp	Ki	Kd	Tiempo de subida (s)	Tiempo estimado del objetivo (s)
2.33	3.05	31.60	10	10.01	10.01	4.02	20
2.33	3.88	66.44	10	8.01	8.01	3.92	20
2.33	3.06	31.51	10	8.01	10.01	4.47	21
2.72	3.68	40.82	8	10.01	10.01	3.62	NO
2.44	2.55	4.23	4	0.01	0.01	1.27	12
2.44	2.82	15.35	3	1.01	0.01	0.87	14
2.44	2.54	4.12	3	0.01	0.01	1.57	14
2.44	2.48	1.58	4	0.01	1.01	2.19	10
2.44	2.67	9.28	4	1.01	0.01	0.87	13
2.73	2.79	2.14	4	0.01	0.01	5.13	15
2.73	2.80	2.50	3	0.01	0.01	5.37	15
2.73	2.80	2.50	4	1.01	0.01	4.87	14
2.73	2.75	0.69	4	0.01	1.01	5.77	13

Escenario 1: En este sentido, se ha observado que una de las deficiencias de la aplicación Simiam es que el robot no puede encontrar una solución para evitar los obstáculos en un entorno en el que éstos son variables y se golpea contra el obstáculo. La figura 3.8 muestra al robot simulado en Simiam impactando contra un obstáculo en un entorno en el que la distancia entre obstáculos es reducida. La figura 3.9 muestra la respuesta al escalón del controlador cuyos coeficientes son:  $K_p=4$ ,  $K_i=0.01$ ,  $K_d=0.01$ .

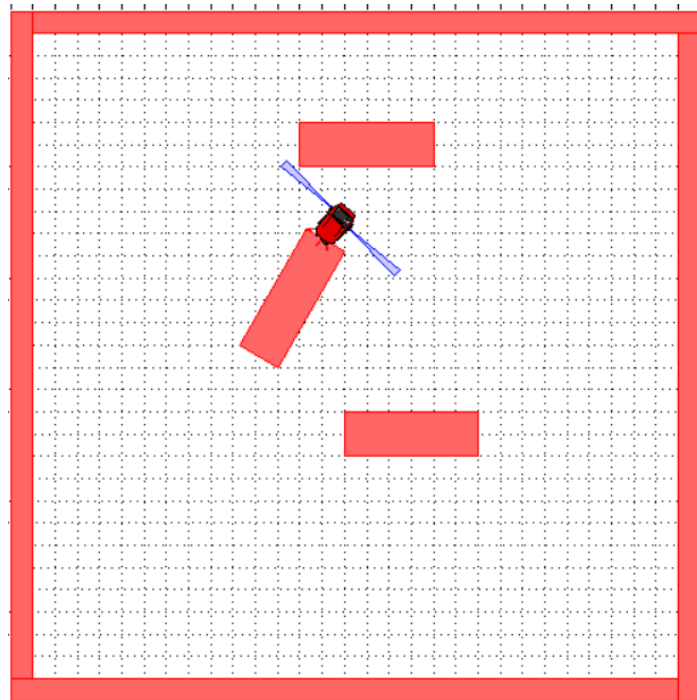


Figura 3. 8: Caso del robot simulado que golpea con un obstáculo para escenario 1.  
Elaborado por: Autor.

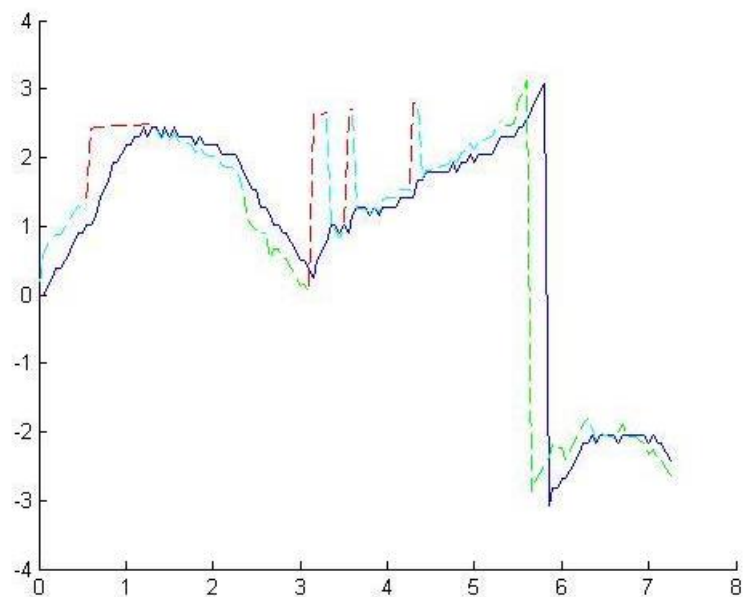


Figura 3. 9: Respuesta al escalón del controlador PID para escenario 1.  
Elaborado por: Autor.

Escenario 2: En este estudio se ha resuelto este problema y se ha obtenido un controlador más optimizado adaptando los coeficientes P, I y D en función de las condiciones ambientales y de las características del hardware del robot. La figura 3.10 muestra el robot con los coeficientes del controlador PID diseñados, consigue desplazarse hacia el objetivo evitando

los obstáculos. La figura 3.11 muestra la respuesta al escalón del controlador PID cuyos coeficientes son  $K_p=6$ ,  $K_i=0.08$  y  $K_d=0.09$ .

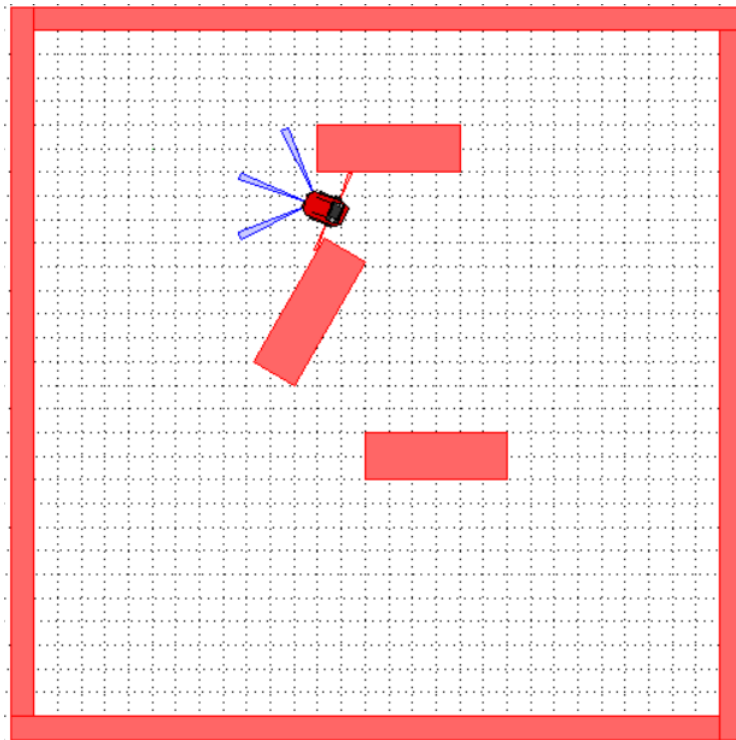


Figura 3. 10: Caso del robot simulado evadiendo obstáculos para escenario 2.  
Elaborado por: Autor.

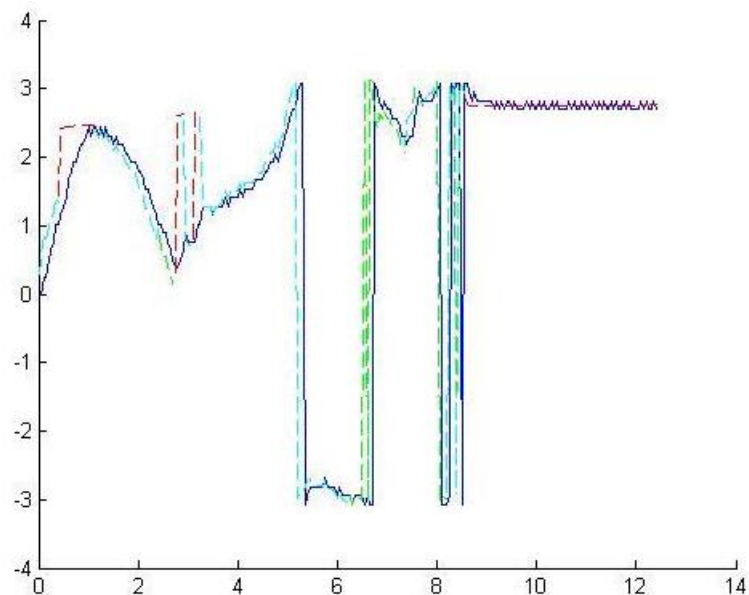


Figura 3. 11: Respuesta al escalón del controlador PID para escenario 2.  
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.12, se muestran las respuestas al escalón de los parámetros del controlador PID utilizados en los escenarios 1 y 2. La



respuesta al escalón indicada con línea azul pertenece al escenario 1 cuyos parámetros son  $K_p=4$ ,  $K_i=0.01$ ,  $K_d=0.01$ . La respuesta al escalón indicada con línea verde pertenece al escenario 2 cuyos parámetros se eligieron como  $K_p=6$ ,  $K_i=0.08$ ,  $K_d=0.09$ . Según se observa en la figura 3.12 el tiempo de asentamiento del controlador PID diseñado para el escenario 2 es mucho más corto.

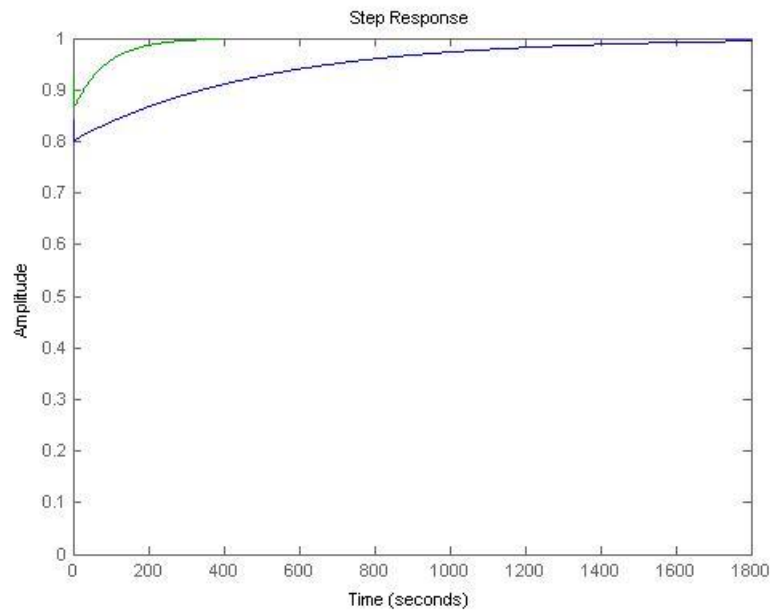


Figura 3. 12: Comparativa de la respuesta al escalón del controlador PID para los escenarios 1 y 2.

Elaborado por: Autor.

### 3.3.2. Comparación de los algoritmos de supervisión

La tabla 3.3 muestra los algoritmos utilizados en el movimiento de evasión de obstáculos del robot móvil simulado (escenario 1 y escenario 2 modificado), así como las situaciones de obstáculos en el entorno. Para la prueba, se toma como base el movimiento del robot de (0,0) a (-1,1). La figura 3.13 muestra el entorno de simulación estático y las ubicaciones de los obstáculos utilizados para la simulación. La figura 3.14 muestra la trayectoria de movimiento del robot en este entorno implementado.

Escenario 1 sin modificar es el algoritmo de control del robot.

Escenario 2: es el algoritmo del controlador del robot del escenario 1 adaptado a este escenario y los valores PID optimizados del robot.

Tabla 3. 3: Resumen de resultados obtenidos para los escenarios 1 y 2.

Control PID	Obstáculos								
	0	3	2	1	2 y 3	1 y 2	1 y 3	1, 2 y 3 (normal)	1, 2 y 3 (estrecho)
Escenario 1	9	9	10	10	11	11	10	11	7
Escenario 2	10	10	11	10	12	12	10	12	14

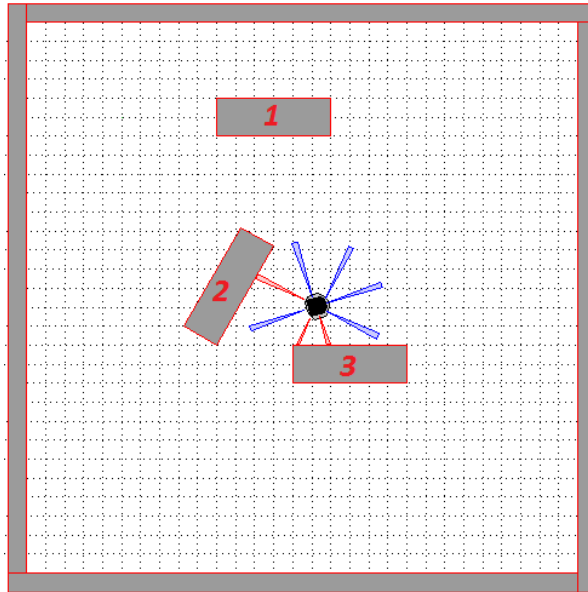


Figura 3. 13: Escenario general del entorno de simulación del robot móvil y objetos estáticos.

Elaborado por: Autor.

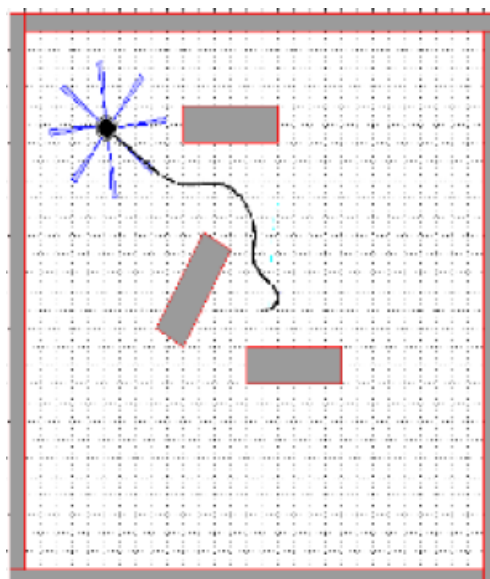


Figura 3. 14: Representación de la trayectoria del robot móvil.

Elaborado por: Autor.

Analizando los datos de la tabla 3.3, se observa lo siguiente

1. El robot del escenario 1 alcanzó el objetivo antes que el robot del escenario 2 en el entorno de simulación donde no hay obstáculos.
2. El robot del escenario 1 alcanzó el objetivo antes que el robot del escenario 2 en el entorno de simulación donde hay el 2do y 3er obstáculo por separado, 2do y 3er obstáculo, 1er y 2do obstáculo juntos, obstáculos 1, 2 y 3 juntos.
3. Se ha observado que el escenario 1 y el robot del escenario 2 alcanzan el objetivo en el mismo tiempo en el entorno de simulación en el que sólo el 1er obstáculo y el 1er y 3er obstáculo están juntos.
4. En el entorno de simulación en el que se ha reducido la distancia entre los obstáculos 1 y 2, se ha observado que el robot del escenario 1 no ha podido escapar del obstáculo como en la figura 3.8 y golpeó el obstáculo 2. Con los coeficientes modificados del controlador PID en el escenario 2 (véase la figura 3.10) del robot en el escenario 2, ha sido capaz de moverse hacia el objetivo pasando por obstáculos de rango reducido sin chocar con los obstáculos. Al reducirse la distancia entre los obstáculos, el tiempo para alcanzar el objetivo del robot del escenario 2 ha aumentado en un 17% en comparación con el tiempo para alcanzar el objetivo en el entorno actual.

El escenario 2 surgió como un modelo mejorado que optimizó al robot del escenario 1. Independientemente de las condiciones del entorno para alcanzar el objetivo, el controlador PID se configuró en consecuencia y se consiguió el mejor rendimiento. Se ha observado que la determinación y optimización de los coeficientes PID provocará una pérdida de tiempo en un entorno en el que la posición de los obstáculos cambia constantemente. Esto ha sido una desventaja que aumentará el coste computacional.

## **Conclusiones.**

- El estudio se centra en el problema de simulación de la colisión del robot en un entorno en el que la posición del obstáculo visto en los dos escenarios ha cambiado. Este problema se ha resuelto optimizando los coeficientes del controlador PID propuesto.
- Se determinó que el robot móvil golpeaba los obstáculos cuando se cambiaban las posiciones de estos en el entorno de prueba utilizado en la simulación. Se ha observado que el robot del escenario 2, que se desarrolló centrándose en este problema, alcanzó con éxito el objetivo evitando los obstáculos.

## **Recomendaciones.**

A partir del presente trabajo de integración curricular, se recomiendan dos posibles propuestas que se pueden realizar en base al documento presentado,

- Implementación de controladores de lógica difusa en el seguimiento de trayectoria de un robot móvil de tracción omnidireccional basados en entornos de simulación.
  
- Análisis comparativo de controladores PID y Neuro Fuzzy en el seguimiento de trayectoria de un robot móvil direccional basados en entornos de simulación.

## Bibliografía

- Aldemir, A., & Anwer, M. S. (2020). Determination of optimal PID control parameters by response surface methodology. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 142–153. <https://doi.org/10.35860/iarej.711314>
- Anil, C., & Sree, R. P. (2014). Design of Optimal PID Controllers for Integrating Systems. *Indian Chemical Engineer*, 56(3), 215–228. <https://doi.org/10.1080/00194506.2014.910705>
- Cano, J. L. (2013). *Teoría de control en Python con SciPy (II): Control PID* [Foro de Teoría de Control]. Pybonacci. <https://pybonacci.org/2013/11/06/teoria-de-control-en-python-con-scipy-ii-control-pid/>
- Carvalho Filho, J. G. N. D., Carvalho, E. A. N., Molina, L., & Freire, E. O. (2019). The Impact of Parametric Uncertainties on Mobile Robots Velocities and Pose Estimation. *IEEE Access*, 7, 69070–69086. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919335>
- Castaño G., S. A. (2019). *Controlador PI por asignación de polos* [Educación]. Control Automático Educación. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/controlador-pi-por-asignacion-de-polos/>
- Demirtas, M., & Karaoglan, A. D. (2012). Optimization of PI parameters for DSP-based permanent magnet brushless motor drive using response surface methodology. *Energy Conversion and Management*, 56, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.021>
- Kadu, C. B., Tidame, S., Vikhe, P., & Turkane, S. (2019). Design of PI controller for Liquid Level System using Siemens Distributed Control System. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3), 2783–2789. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C5005.098319>

Martínez M., G. (2017). Estrategias de control con Arduino. *G4r1*.  
<https://garikoitz.info/blog/2017/12/estrategias-de-control-con-arduino/>

Moshayedi, A. J., Abbasi, A., Liao, L., & Li, S. (2019). Path planning and trajectory tracking of a mobile robot using bio-inspired optimization algorithms and PID control. *2019 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, 1–6.  
<https://doi.org/10.1109/CIVEMSA45640.2019.9071596>

Seth, S. (2017). *SimlAm* [Matlab]. <https://github.com/SayanSeth/Sim.l.am>



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Vera Vergara, Nathaly Silvana** con C.C: # 050330507-0 autor del Trabajo de Titulación: **Implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 3 de marzo del 2022

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Vera Vergara, Nathaly Silvana

C.C: 050330507-0



## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación		
<b>AUTOR(ES)</b>	Vera Vergara, Nathaly Silvana		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M.Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	3 de marzo del 2022	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	33
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas de Control, Fundamentos de Robótica		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Robótica, Controladores, Proporcional, Integral, Cinemática, Simulación.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>Con la expansión de la automatización, cada vez más tareas son realizadas por robots. Este fenómeno, que al principio afectaba principalmente a la industria, se está extendiendo progresivamente a otros ámbitos. Así, paralelamente a los robots autónomos y a los robots manipuladores generalmente fijados en un lugar específico de una fábrica, cada vez hay más robots móviles capaces de llevar a cabo una misión específica en un lugar o ubicación determinados. Como puede verse, los robots móviles pueden adoptar muchas formas y utilizarse en muchas aplicaciones. En este trabajo de integración curricular, se utiliza un robot móvil de accionamiento direccional, diseñado para realizar tareas autónomas en un entorno preestablecido. De tal manera, que se presenta la “Implementación de sistemas de control PID en robots móviles autónomos usando entornos de simulación”. En el capítulo 1, se describe las generalidades del trabajo de integración curricular. En el capítulo 2, se presenta los fundamentos teóricos de los sistemas de control y de la cinemática de un robot móvil. En el capítulo 3, se presenta la aportación práctica del controlador PID en un robot móvil autónomo.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593 98 210 0933	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:nathvv.98@gmail.com">nathvv.98@gmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			