



# **Diseño de control PID para un mecanismo con movimiento espacial ajustado al IoT**

**JOSE LUIS FRANCO MENDOZA  
21131517401  
CARLOS DAVID MURILLO ANACONA  
21131616291**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Villavicencio , Colombia  
2020

# **Diseño de control PID para un mecanismo con movimiento espacial ajustado al IoT**

**JOSE LUIS FRANCO MENDOZA**  
**21131517401**  
**CARLOS DAVID MURILLO ANACONA**  
**21131616291**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):  
Mag. Ing Alexander Cucaita Gómez

Línea de Investigación:  
Automatización.

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Villavicencio , Colombia  
2020

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por el apoyo que me brindaron durante esta etapa maravillosa, gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es la vida y lo justa que puede llegar a ser, Gracias a mi familia por ayudarme a cumplir con excelencia en el desarrollo de esta proyecto de vida. Gracias por creer en mí y gracias a Dios por permitirme vivir y disfrutar de cada día maravilloso en esta etapa de mi vida.

Gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio, agotadoras noches en las que su compañía y la llegada de sus cafés era para mí como agua en el desierto; gracias a mi padre por siempre desear y anhelar siempre lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida.

El termino gratitud, no siempre es asociado o familiarizado con los maestros, estos en la mayoría de ocasiones son vistos con desprecio y asociados con personas que castigan o nos obligan a realizar actividades extracurriculares que causan banalidad en la optimización de nuestro tiempo; pero la realidad es que estas personas son sumamente importantes en nuestro desarrollo como personas, y especialmente en mi caso mi maestro fue crucial para la realización de esta tesis.

Quiero agradecerle a él por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que me surgiera, agradecerle por la caridad y exactitud con la que enseñó cada clase, discurso y lección.

José Luis

Quiero dedicar este proyecto de grado a Dios y a mis padres José Agustín Murillo y Dora María Anacona por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, a mi esposa Wendy Yurany Contreras por su amor y apoyo incondicionalmente, a mi hijo Juan David Murillo por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día, a mis hermanos, Jhon, Armando, Libardo y Josue, a mis compañeros y amigos porque en su compañía y con su apoyo pude recorrer este camino con éxito y a mis docentes que con su sabiduría y gran conocimiento pude llegar a este punto para dar este gran paso, y les agradezco siempre el haber creído en mi y en mi capacidad, y se puede decir que aquí estoy cumpliendo un sueño, simplemente me siento agradecido.

Carlos David

## Resumen

A lo largo de la historia de la humanidad el objetivo principal de los avances tecnológicos ha sido facilitar las tareas o proceso a los seres humanos, algunos automatismos incluso son capaces de reemplazar en un cien por ciento la mano de obra humana, así como otro tanto que funciona a través de la colaboración entre las capacidades humanas con las facilidades que ofrece las maquinas inteligentes. Una de las tecnologías más usadas en todos los tipos de proceso asistidos, semi asistidos o automáticos es el controlador PID, debido a su robustez eficiencia y precisión, esto combinado con demás componentes como actuadores y dispositivos de instrumentación, forman mecanismos inteligentes que ahora van de la mano con el internet de las cosas y la comunicación inalámbrica, logrando así un control total sobre las maquinas desde todo punto de vista.

En este proyecto se realiza un diseño a nivel de prototipo que da cumplimiento a lo descrito, donde junto al proceso automatizado por un controlador PID se controla la posición en dos ejes de algún objeto, de igual manera se sugieren aplicaciones para el prototipo junto a una revisión bibliográfica acompañada de una propuesta para la integración del prototipo diseñado en el concepto de Industria 5.0, de esta manera encontrara un libro dividido en 5 capítulos, el primero hace referencia a la revisión bibliográfica y la conceptualización de los procesos futuros a utilizar, el segundo describe el proceso del diseño del controlador PID, el tercero relaciona el diseño de una aplicación Android con el protocolo de comunicación que involucrará el proyecto en el mundo del IoT. En el cuarto capitulo se describe la implementación general del prototipo explicando los componentes y como se unieron los procesos previamente mencionados y por último en el capítulo 5 se encuentran las conclusiones y recomendaciones para proyectos futuros.

**Palabras clave: (PID, motor DC, MBED, Industria 5.0, MQTT).**

## Abstract

Throughout the history of humanity, the main objective of technological advances has been to facilitate tasks or processes to human beings, some automatism that are even capable of replacing one hundred percent of human labor, as well as another that works through the collaboration between human capacities with the facilities offered by intelligent machines, One of the most used technologies in all types of assisted, semi assisted or automatic processes is the PID controller, due to its robustness, efficiency and precision, this combined with other components such as actuators and instrumentation devices, form intelligent mechanisms that now go hand in hand with the internet of things and wireless communication, achieving total control over the machines from all points of view.

In this project, a design is made at prototype level that fulfills the described, where together with the automated process by a PID controller, the position in two axes of some object is controlled. In the same way, applications for the prototype are suggested together with a bibliographic review accompanied by a proposal for the integration of the designed prototype in the concept of Industry 5.0, so you will find a book divided in 5 chapters, the first one refers to the bibliographic review and the conceptualization of the future processes to be used, the second one describes the design process of the PID controller, the third one relates the design of an Android application with the communication protocol that will involve the project in the world of the IoT, in the fourth chapter the general implementation of the prototype is described explaining the components and how the previously mentioned processes were joined and finally in the chapter 5 you will find the conclusions and recommendations for future projects.

**Keywords: (PID, DC Motors, MBED, 5.0 Industry, MQTT).**

# Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>8</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>9</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>10</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>Marco Teórico</b> .....	<b>13</b>
1.1 Sistema de control.....	13
1.1.1 Controlador PID .....	15
1.2 Motor DC.....	23
1.3 Industria 5.0 .....	24
<b>2. Controlador</b> .....	<b>27</b>
2.1 Identificación de la planta .....	27
2.2 Diseño del controlador .....	30
<b>3. Comunicación humano-maquina CHM</b> .....	<b>33</b>
3.1 MQTT.....	33
3.2 Hardware y software .....	34
3.2.1 Aplicación Android .....	35
3.2.2 Modulo WiFi.....	37
<b>4. Implementación del prototipo</b> .....	<b>39</b>
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>45</b>
5.1 Conclusiones.....	45
5.2 Recomendaciones.....	45
<b>Bibliografía</b> .....	<b>47</b>

# Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Proceso a controlar. ....	14
<b>Figura 1-2:</b> Representación de un sistema en bloques. a) Lazo abierto. b) Lazo cerrado con realimentación. ....	14
<b>Figura 1-3:</b> Proceso de Diseño de un sistema de control. ....	15
<b>Figura 1-4:</b> Diagrama estructural de un sistema en lazo cerrado. ....	16
<b>Figura 1-5:</b> Sistema de control en lazo cerrado con control PID. ....	17
<b>Figura 1-6:</b> Respuesta del sistema ante variaciones de $K_p$ . ....	18
<b>Figura 1-7:</b> Respuesta del sistema ante variaciones de $T_d$ . ....	19
<b>Figura 1-8:</b> Respuesta del sistema ante variaciones de $T_i$ . ....	20
<b>Figura 1-9:</b> Respuesta al escalón unitario de la planta. ....	21
<b>Figura 1-10:</b> Obtención datos L y T. ....	22
<b>Figura 1-11:</b> Periodo de la señal $P_{cr}$ . ....	24
<b>Figura 1-12:</b> Circuito equivalente a un motor DC. ....	24
<b>Figura 1-13:</b> Desde la industria 1.0 a la 5.0. ....	26
<b>Figura 1-14:</b> Principios de la industria 5.0. ....	26
<b>Figura 2-1:</b> Respuesta en RPM del motor al 50%. ....	28
<b>Figura 2-2:</b> Señales de entrada y salida para el proceso de identificación de la planta. ....	29
<b>Figura 2-3:</b> Modelos de salida con porcentaje de ajuste a la planta real. ....	29
<b>Figura 2-4:</b> Función de transferencia de la planta. ....	29
<b>Figura 2-5:</b> Ventana "Control System Designer" de la herramienta Sisotool de Matlab con el controlador diseñado. ....	32
<b>Figura 2-6:</b> Ecuación respuesta arrojada de Matlab con el comando ZPK. ....	33
<b>Figura 3-1:</b> Esquema de comunicación. ....	35
<b>Figura 3-2:</b> Interfaz de la aplicación diseñada. ....	36
<b>Figura 3-3:</b> Diagrama de flujo de la aplicación. ....	37
<b>Figura 3-4:</b> PINOUT ESP12E. ....	38
<b>Figura 3-5:</b> Diagrama de flujo del algoritmo de la ESP12E. ....	39
<b>Figura 4-1:</b> Tarjeta de desarrollo FRDM-K64F. ....	39
<b>Figura 4-2:</b> Diagrama de flujo algoritmo general del sistema. ....	41
<b>Figura 4-3:</b> Diagrama de flujo función del controlador. ....	42
<b>Figura 4-4:</b> Motorreductor DC con encoder. ....	42
<b>Figura 4-5:</b> a. Circuito integrado L298N, b. Circuito puente H. ....	44
<b>Figura 4-6:</b> Montaje del prototipo. ....	45



## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Obtención $K_p$ , $T_d$ y $T_i$ método 1. ....	23
<b>Tabla 1-2:</b> Obtención $K_p$ , $T_d$ y $T_i$ método 2. ....	24
<b>Tabla 1-3:</b> Cuestiones relacionadas con la integración de los robots en las organizaciones. ....	27

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$e(t)$	Error	-	Figura 1-5
$h(t)$	Señal de retroalimentación	-	Figura 1-5
$K_{cr}$	Ganancia crítica	-	-
$K_p$	Constante proporcional	-	Tabla1-1 y 1-2
$L$	Tiempo de retraso	S	Figura 1-10
$P_{cr}$	Periodo señal ganancia crítica	-	Figura 1-11
$r(t)$	Valor de referencia	-	Figura 1-5
$T$	Tiempo	S	Figura 1-10
$T_d$	Constante Derivativa	-	Tabla1-1 y 1-2
$T_i$	Constante integral	-	Tabla1-1 y 1-2
$y(t)$	Valor de salida deseado	-	Figura 1-5

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>DC</i>	Corriente Directa
<i>IA</i>	Inteligencia Artificial
<i>IDE</i>	Entorno de Desarrollo Integrado
<i>IoT</i>	Internet de las cosas
<i>IP</i>	Internet Protocol
<i>M2M</i>	Maquina a Maquina
<i>MQTT</i>	Message Queue Telemetry Transport
<i>PID</i>	Proporcional Integral Derivativo
<i>PLC</i>	Controlador Lógico Programable
<i>RPM</i>	Revoluciones por minuto
<i>SoC</i>	System on chip
<i>TCP</i>	Transmission Control Protocol

## Introducción

La industria es de vital importancia para el desarrollo de la humanidad, dado que con cada una de las revoluciones industriales el progreso científico y la calidad de vida mejoraron de manera extraordinaria, por tal motivo cada proyecto orientado en dirección de la evolución en este campo será un avance en bienestar general (Skobelev & Borovik, 2018).

Aunque en la actualidad se trabaja en direccionar los desarrollos hacia la industria 5.0, muchos expertos empezaron el desarrollo de la quinta revolución industrial (industria 5.0) (Zambon et al., 2019), como fundamento la industria 5.0 plantea el trabajo cooperativo entre robots y humanos, que a diferencia de la actual industria 4.0, plantea la inclusión de máquinas y/o robots capacitados a realizar su trabajo autónomo con características de trabajar sobre el internet de las cosas (IoT), uso de inteligencia artificial (IA) y que sobre todo puedan trabajar a la par con el operador adaptando su funcionamiento a los posibles cambios de los procesos (Demir et al., 2019).

Por otra parte, aún hay muchas necesidades en procesos industriales y/o autónomos que requieren de la intervención científica para hacer de estos óptimos, este proyecto se centró en dar solución a procesos que requieran de ajustes precisos en cuanto a su posición angular cuando estos son actuados por un motor, aunque en el campo de la robótica tanto como en la industria las características de los motores utilizados son muy variados, razón por la cual se optó por solo evaluar un proceso para motores DC (Carlos et al., 2017; Durdu & Dursun, 2019).

Dentro de los procesos que requieren atención y que su desarrollo se basa en motores DC, se proponen el ajuste de arreglos de paneles fotovoltaicos a fin de obtener mayor generación (Narendra et al., 2019; Natalia et al., 2016), otra utilidad propuesta es el ajuste de la orientación automatizado de antenas de televisión o comunicaciones, donde a pesar de tener precisión en los cálculos de orientación en muchos casos se hace necesario de ajustes mínimos pero necesarios de manera manual, que en situaciones normales donde la ubicación de las antenas estará a más de 5 metros de altura su ejecución será compleja (Miawarni et al., 2018).

Al unir las dos necesidades mencionadas en este trabajo se ajustará el prototipo que da solución a las necesidades prácticas los principios de la industria 5.0, y aunque este concepto está en construcción, la literatura existente soportan lo suficiente para irse adentrando en este campo, dejando como proceso final el diseño de un controlador PID que permita controlar la posición angular del rotor y dar precisión en el ajuste de procesos como los anteriormente mencionados, adicional a esto se implementó una aplicación soportada sobre dispositivos con sistema operativo Android, con la cual será posible ajustar el ángulo deseado en cada uno de los ejes (x o y), introduciéndolo en el celular, o realizar un escaneo o ajuste con el giroscopio del teléfono (Martín Rodríguez, 2012).

No obstante, a fin de que se cumpla con el objetivo de dirigir el proyecto en el camino de la industria 5.0, los procesos se realizaron haciendo uso de comunicación inalámbrica mediante el protocolo MQTT. El uso de esta comunicación facilita el acceso de los datos de manera distribuida, evitando el tedioso proceso de control con comunicación punto a punto, adicional a esto se plantea dejar abierta la opción de gestionar la información y almacenarla en bases de datos que serán de vital utilidad para el manejo de BIG DATA, y posterior inclusión de inteligencia artificial, a pesar de que en este proyecto el método de control es un diseño típico mediante PID, se sientan las bases y los datos para que en futuros trabajos se pueda realizar un control mediante métodos como redes neuronales (Özdemir & Hekim, 2018).

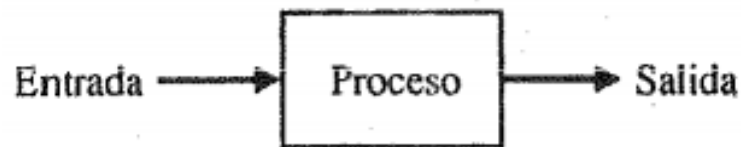
Finalmente, en busca de cubrir un área mayor se buscaron tarjetas de desarrollo que garantizaran un funcionamiento óptimo, a pesar de saber que en la industria actualmente predomina el uso de PLCs, se tomó la decisión de trabajar sobre una MBED que daría la opción de cubrir un campo mayor de aplicaciones reduciendo los costos de implementación sin disminuir el rendimiento. Cabe aclarar que, aunque se tomó esta decisión la idea central del proyecto no radica en la selección de materiales sino en el desarrollo del diseño y que permita en trabajos futuros emular este proyecto con la inclusión de los materiales pertinentes para la aplicación deseada y con esto estar un paso más cerca de los últimos desarrollos y protocolos para la industria, si es que se realiza un proyecto en este campo, o simplemente un proceso óptimo para aplicaciones en general.

## Marco Teórico

### 1.1 Sistema de control

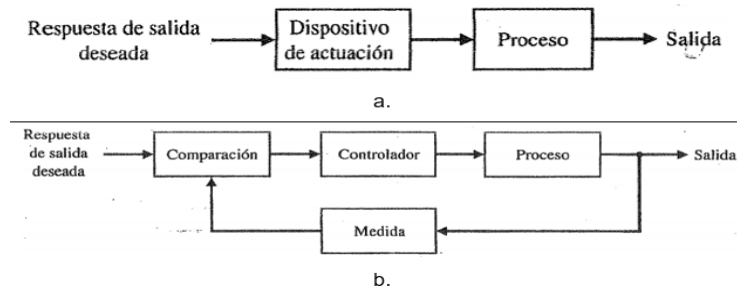
Se define un sistema de control como un grupo de componentes que conectados conforman cierta configuración capaz de proporcionar una respuesta u orden requerida en un determinado proceso. En la Figura 1-1. Se ve representado mediante un bloque la relación entrada-salida entre la causa y efecto del proceso a ser controlado. (Dorf & Bishop, 2005)

**Figura 2-1:** Proceso a controlar.



Fuente : (Dorf & Bishop, 2005)

**Figura 2-2:** Representación de un sistema en bloques. a) Lazo abierto. b) Lazo cerrado con realimentación.



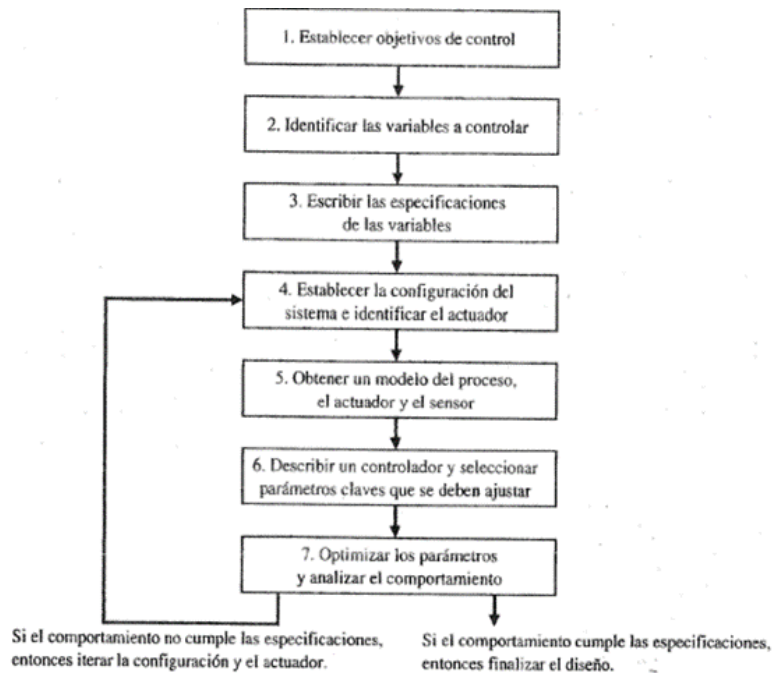
Fuente: (Dorf & Bishop, 2005)

Los sistemas de control se clasifican en sistema de control en lazo abierto que como se observa en la Figura 1-2 es un sistema sin realimentación, que generalmente hace uso de un actuador para conseguir la salida deseada en el proceso. Y los sistemas de control en lazo cerrado que utilizan la medida de salida (señal de realimentación) para compararla con la referencia deseada y usa esta diferencia como medio de control.(Ogata, 2003)

El pilar principal de la ingeniería de control es el diseño, planificación y desarrollo de sistemas capaces de ofrecer de manera óptima comportamientos u objetivos específicos. Por lo que la teoría de control moderna enfatiza en sistemas con grandes capacidades de aprendizaje, autoorganización y adaptación, o en concreto la automatización de procesos que brindan eficiencia y eficacia en términos de producción en gran parte de sectores comerciales e industriales. (Benjamin-c-kuo, 1996)

El objetivo de diseños de sistemas de control es satisfacer una necesidad real a través de una configuración de componentes y partiendo de las características y parámetros claves del sistema.

**Figura 2-3:** Proceso de Diseño de un sistema de control.



Fuente: (Dorf & Bishop, 2005)

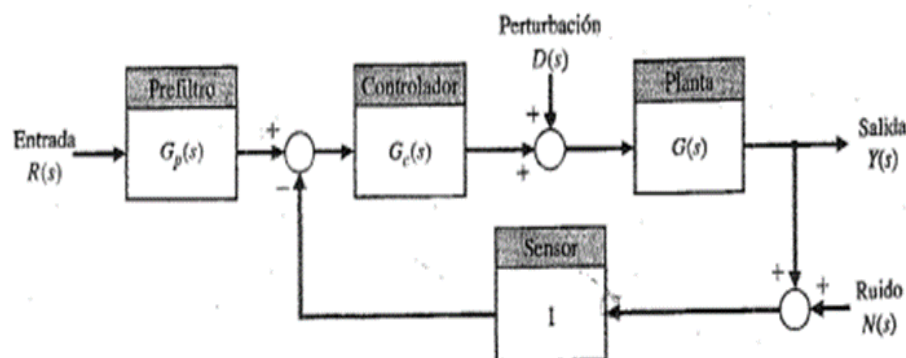
En (Dorf & Bishop, 2005) definen el proceso general de diseño para sistemas de control. Como se muestra en la Figura 1-3. el primer paso se refiere a la selección de la tarea que cumplirá el sistema, luego se debe identificar las variables a controlar, para así mismo analizar sus especificaciones y concluir con qué porcentaje de precisión se deben tomar las medidas de las variables. Para así mismo establecer la configuración del sistema que consiste generalmente en un sensor, un controlador, el proceso bajo control y un

actuador capaz de ajustar el comportamiento del proceso. Y el último paso es ajustar los parámetros para que el sistema actúe de manera óptima.

Siguiendo el modelo de diseño preestablecido se asume el conocimiento de la planta y el controlador, además de los parámetros constantes, pero se presentan varias causas externas que hacen que el modelado de la planta sea una representación imprecisa del sistema físico real. Como lo son los cambios de parámetros, ruido en el sensor, entradas de perturbación no predecibles, retardos de tiempos, etc... (Ferheen & Chidambaram, 2017) Para mitigar dichos problemas es necesario diseñar sistemas capaces de asegurar el comportamiento del proceso independientemente de las imprecisiones o cambios de modelo, estos sistemas se conocen como sistema robusto y ofrecen el comportamiento deseado del sistema a pesar de presencia de incertidumbres significativas en el proceso. La robustez es la sensibilidad a efectos que no se consideraron en la etapa de diseño. (Vilanova, 2011)

En la Figura 1-4 se muestra un sistema que incluye incertidumbres como, el ruido del sensor, la entrada de perturbación no predicha y la planta con posibles cambios en los parámetros.

**Figura 2-4:** Diagrama estructural de un sistema en lazo cerrado.



Fuente: (Dorf & Bishop, 2005)

### 1.1.1 Controlador PID

El controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) es el tipo de controlador más utilizado en la industria, alrededor de 95% de los lazos de control emplean un PID, esta

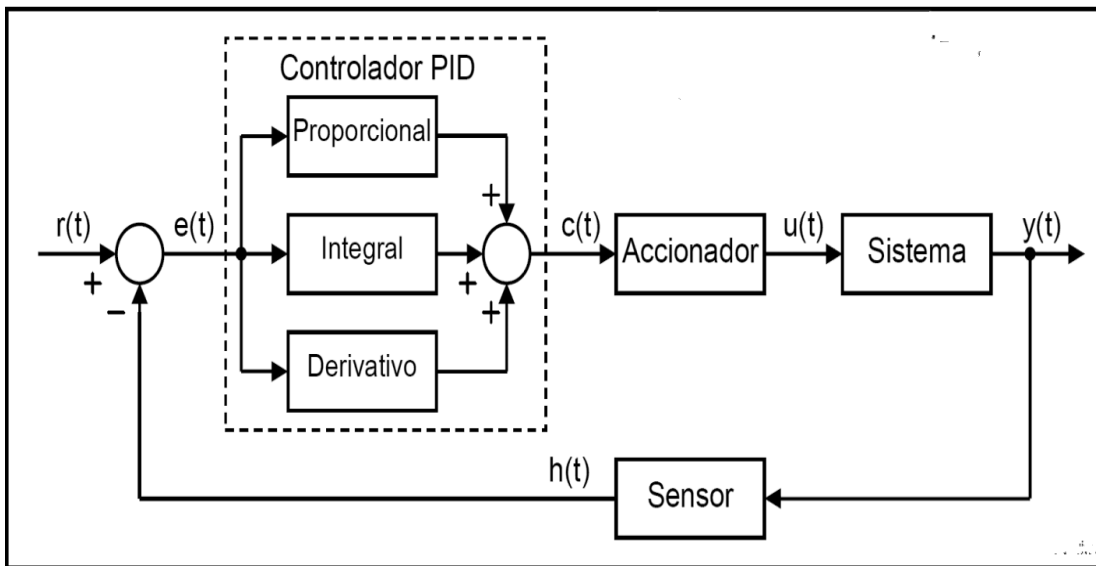
popularidad se debe a que, a su comportamiento robusto en gran medida de las condiciones de operación de los sistemas, además de lo simple de su funcionalidad. La función de transferencia de un controlador PID se muestra en la Ecuación 1-1.(Mayor & Andres, 2001) (Åström & Hägglund, 2009)

$$G(s) = k_1 + \frac{k_2}{s} + k_3s \quad (1-1)$$

No existe un estándar de diseño para los controladores PID, pero a continuación se describen ciertas características y especificaciones que debe tener un PID.

- **Señal de referencia y señal de error**

**Figura 2-5:** Sistema de control en lazo cerrado con control PID.



Fuente:(Pardo, n.d.)

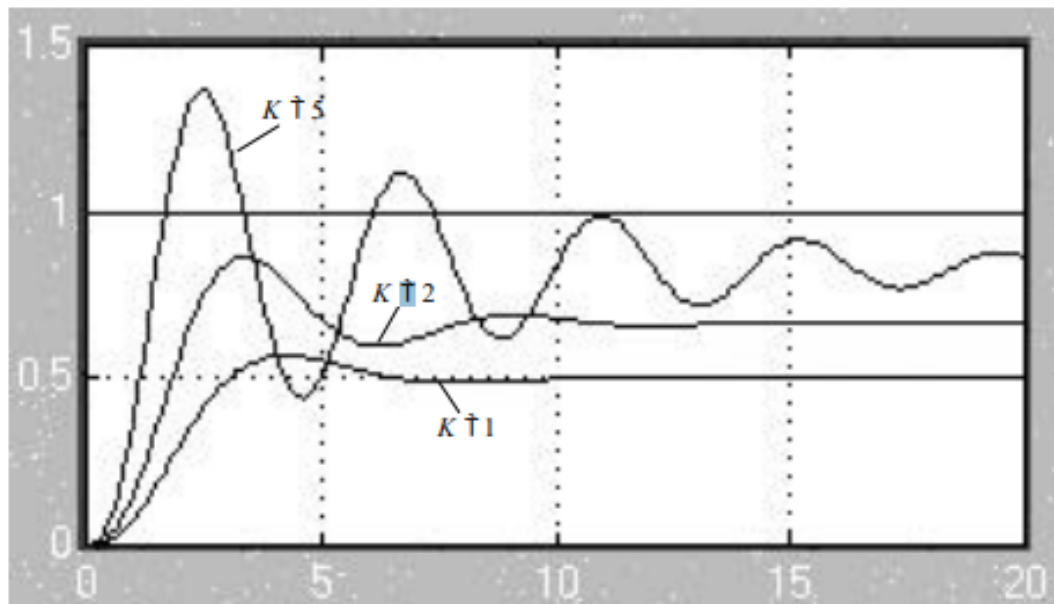
Como se observa en la Figura 1-5.  $r(t)$  representa el valor de referencia o de operación, es decir, el valor que se espera conseguir luego de todo el proceso en la salida del sistema  $y(t)$ . la entrada del controlador PID se ve representado por la diferencia entre el valor de referencia, el estado que se quiere conseguir  $r(t)$  y el estado real del sistema  $h(t)$ , dato que se obtiene a través de un sensor, esta diferencia se conoce como error  $e(t)$ , error que toma como objetivo corregir el controlador PID.(Mayor & Andres, 2001)



- **Acción proporcional**

Debe su nombre a que esta acción de control es proporcional al valor del error  $e(t)$  del sistema. La función principal de la acción proporcional es multiplicar la señal de error por una constante que recibe la nomenclatura  $K_p$ , esto con el objetivo de generar una variable de corrección que minimice el error del sistema. La adición de la constante proporcional ofrece ventajas como el aumento en la velocidad de respuesta del sistema y la disminución en el error del sistema en régimen permanente, pero se debe tener en cuenta que al aumentar este valor hay un punto de equilibrio donde se aprovecha al máximo las dos ventajas expuestas y se obtiene el menor porcentaje de inestabilidad en el sistema, que es la desventaja principal de  $K_p$ , es decir que al excederse en el valor de  $K_p$  se obtiene respuesta más rápida y precisa del sistema pero se aumenta la inestabilidad del sistema algo que es indeseable para el proceso de control. (Mayor & Andres, 2001) (Cova, 2005)

**Figura 2-6:** Respuesta del sistema ante variaciones de  $K_p$ .



Fuente: (Mayor & Andres, 2001)

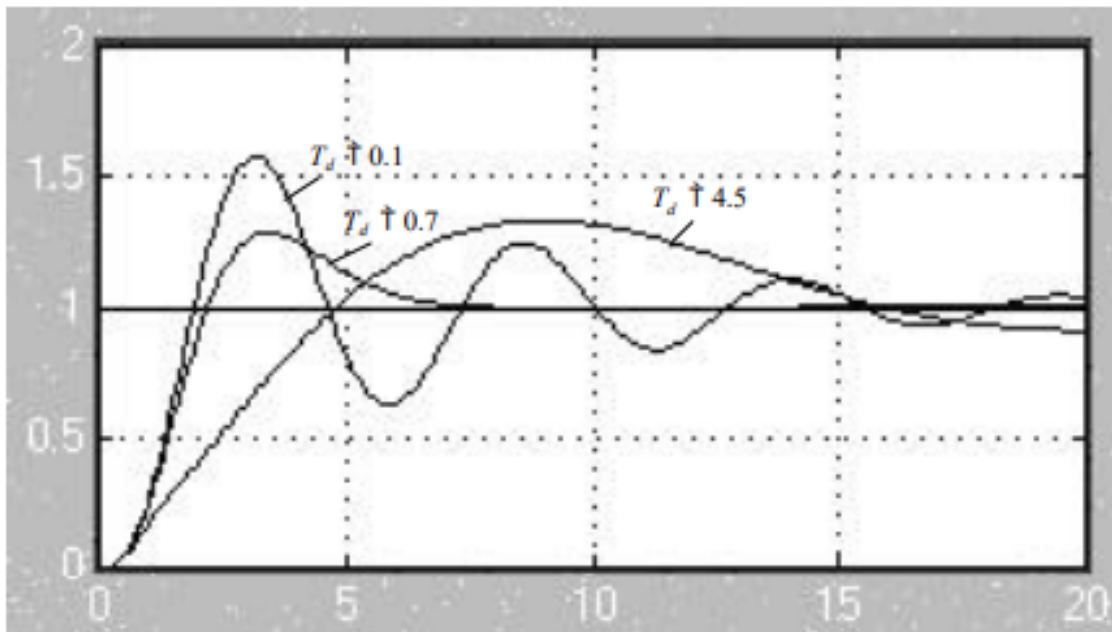
- **Acción derivativa**

Como su nombre lo indica, esta acción es proporcional a la derivada de la señal de error  $e(t)$ . La función de la acción de control derivativa es disminuir el valor de los picos

ocasionados por la constante proporcional ya que al aumentar la velocidad de respuesta del sistema cuando la posición se encuentra cerca del valor de referencia sigue aumentando por un instante y provoca oscilaciones hasta llegar a un valor constante, esto se debe a la inercia misma de la velocidad de la señal, para evitar esto el controlador debe reconocer con antelación la velocidad a la que el sistema se acerca al punto de referencia para poder disminuir la misma un instante antes de llegar al punto de referencia y así evitar este sobrepaso de la señal.

Al aumentar la constante de control derivativa  $T_d$  como se observa en la Figura 1-7 se disminuye la velocidad del sistema, pero se justifica aumentando la estabilidad del sistema controlado, es constante no afecta de ninguna forma el error en régimen permanente del sistema. (Mayor & Andres, 2001)(Cova, 2005)

**Figura 2-7:** Respuesta del sistema ante variaciones de  $T_d$ .



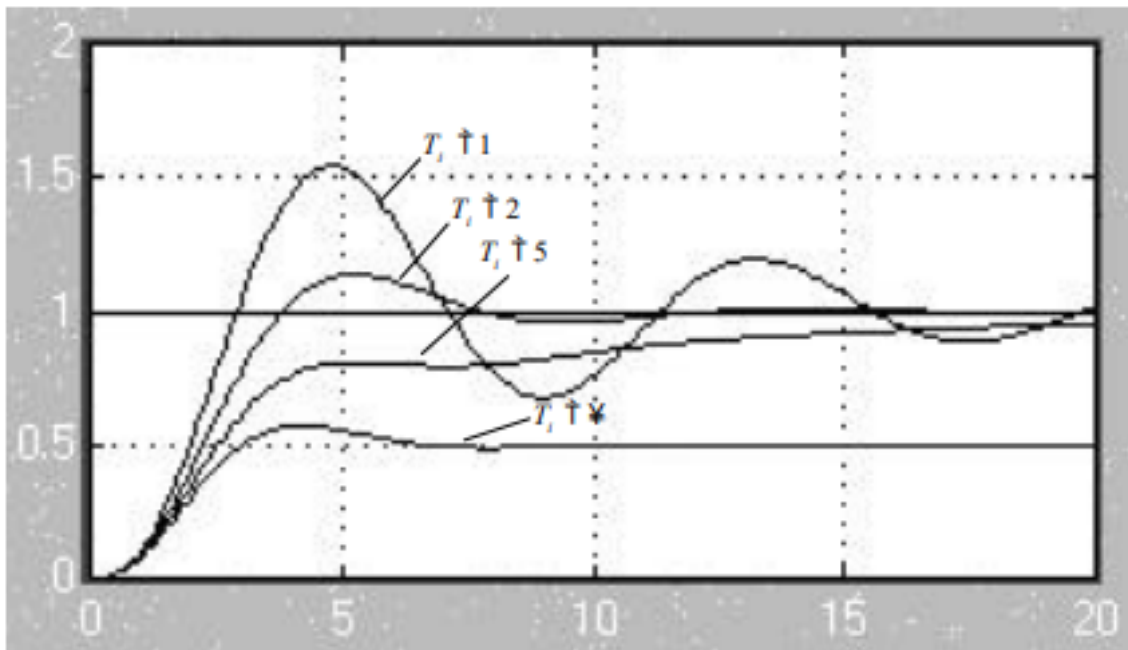
Fuente: (Mayor & Andres, 2001)

Como contra el control derivativo tiene un inconveniente que amplifica las señales que varían rápidamente, por ejemplo, el ruido de alta frecuencia. Para reducir este efecto adverso se debe reducir el ruido de la señal de error a través de un filtro pasa bajos antes de aplicarla al término derivativo.

- **Acción Integral**

Luego de aplicar las constantes  $K_p$  y  $T_d$ , se obtiene un sistema rápido y estable, pero no preciso, ya que conserva un pequeño error en régimen permanente, lo que quiere decir que la posición real del sistema no es la posición deseada, para reducir este error se debe acudir a la inclusión de la acción de control integral. Que calcula la integral de la señal error  $e(t)$ . es integral se describe como la suma o acumulación de la señal de error. Pues a medida que avanza el tiempo de respuesta pequeños errores se van sumando para hacer que la acción integral aumente. Reduciendo así el error del sistema en régimen permanente y también aumenta mínimamente la velocidad y respuesta del sistema (Figura 1-8), como desventaja también ejerce una inercia en el sistema que produce un aumento en términos de inestabilidad el sistema. (Mayor & Andres, 2001) (Cova, 2005)

**Figura 2-8:** Respuesta del sistema ante variaciones de  $T_i$ .



Fuente: (Mayor & Andres, 2001)

- **Reglas de sintonización para controladores PID**

El mayor problema de los controladores PID es la sintonía adecuada de los parámetros  $K_p$ ,  $T_d$  y  $T_i$  para producir una respuesta adecuada a la variable controlada que atienda a

los objetivos de control. A continuación, se exponen un método de sintonización manual y dos métodos presentados por Ziegler-Nichols con una serie de reglas que facilitan el proceso de sintonización del controlador.

- **Sintonización Manual**

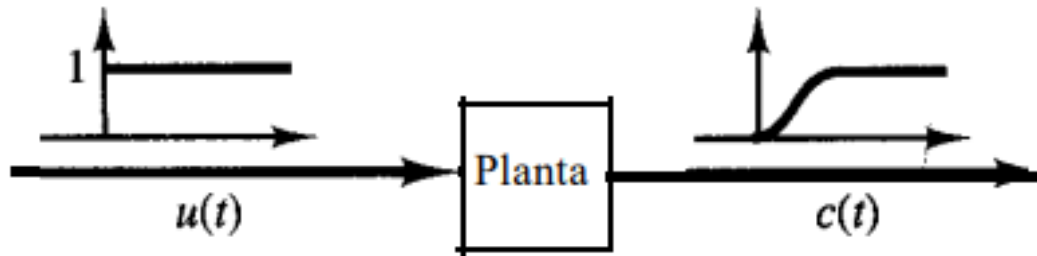
- Para encontrar la **acción proporcional** primeramente se aumenta poco a poco para disminuir el error y aumentar la velocidad de respuesta del sistema, si se alcanza la respuesta deseada en velocidad y error sería todo, si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir el control deseado se debe aumentar la acción derivativa.
- Si el sistema es inestable se debe aumentar el valor de la **acción derivativa** hasta conseguir estabilidad en la respuesta del sistema.
- En caso de que el error en régimen permanente del sistema sea mayor que el deseado, se debe aumentar el valor de la constante de **acción integral** hasta conseguir valor mínimo posible de error en la respuesta del sistema. Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta indicada se debe nuevamente recurrir al aumento de  $T_d$ .(Pardo, n.d.)

- **Métodos Ziegler-Nichols**

Los métodos de Ziegler-Nichols facilitan el ajuste de los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento de un controlador PID sin necesidad de conocer previamente el modelo matemático que define la planta. Estas reglas de ajuste fueron publicadas en 1942 y hoy por hoy es uno de los métodos de sintonización más utilizados.(Åström & Hägglund, 2009)

El primero de los métodos se refiere a la sintonización basada en la **respuesta al escalón unitario** de la planta como se observa en la Figura 1-9. Si la respuesta obtenida no es en forma de “S” este método no es el óptimo para la planta.

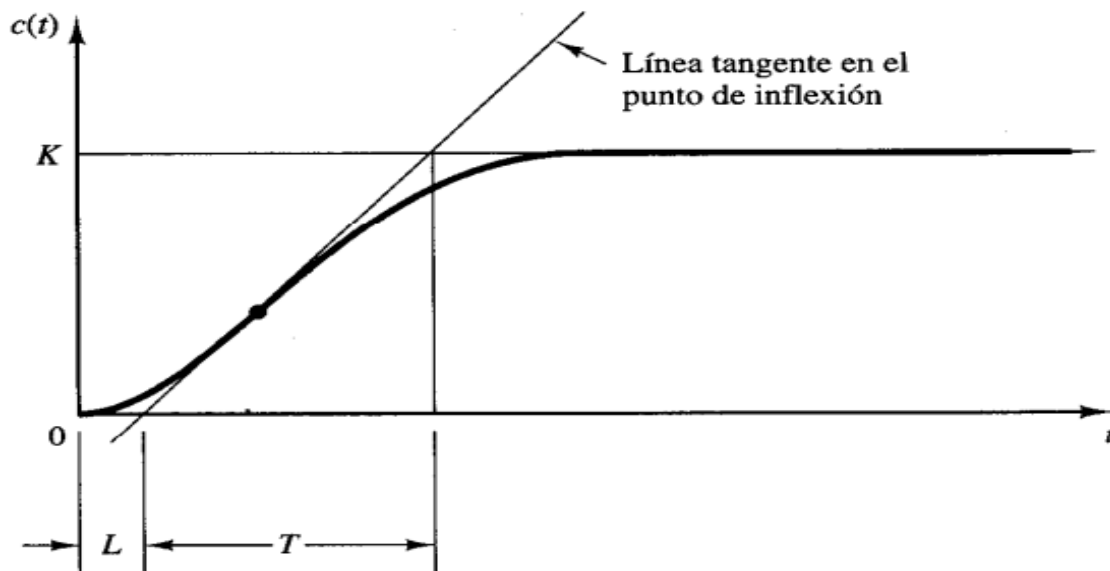
**Figura 2-9:** Respuesta al escalón unitario de la planta.



Fuente : (Dorf & Bishop, 2005)

Dicha curva en forma de S se caracteriza por dos parámetros el tiempo de retardo  $L$  y la constante de tiempo  $T$ , estos valores se obtienen como se muestra en la Figura 1-10 trazando una línea tangente en el punto de inflexión de la curva.

**Figura 2-10:** Obtención datos  $L$  y  $T$ .



Fuente : (Dorf & Bishop, 2005)

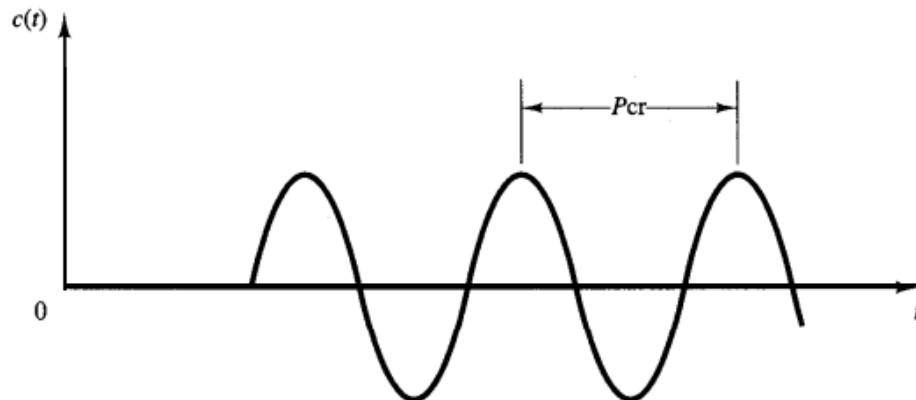
Una vez encontrados los valores de  $L$  y  $T$ , Ziegler-Nichols determinaron las fórmulas mostradas en la Tabla 1-1 para obtener los valores de las constante  $K_p$ ,  $T_d$  y  $T_i$ . (Mayor & Andres, 2001)

**Tabla 2-1:** Obtención  $K_p$ ,  $T_d$  y  $T_i$  método 1.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: (Dorf & Bishop, 2005)

El segundo método es la sintonización por la **ganancia crítica en lazo cerrado**, lo primero es establecer  $T_d$  y  $T_i$  en 0, para luego aumentar gradualmente la acción proporcional hasta conseguir una respuesta con oscilaciones sostenidas, (en caso de no conseguir una oscilación constante con ningún valor de  $K_p$  la planta no es óptima para aplicar este método), el valor  $K_p$  encontrado se conoce como ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo de la oscilación correspondiente  $P_{cr}$  (Figura 1-11). (Fernando Firmino, 2014)

**Figura 2-11:** Periodo de la señal  $P_{cr}$ .

Fuente : (Dorf & Bishop, 2005)

Una vez conocidos los valores de  $K_{cr}$  y  $P_{cr}$  se calculan los parámetros para el PID basados en las fórmulas de la Tabla 1-2.

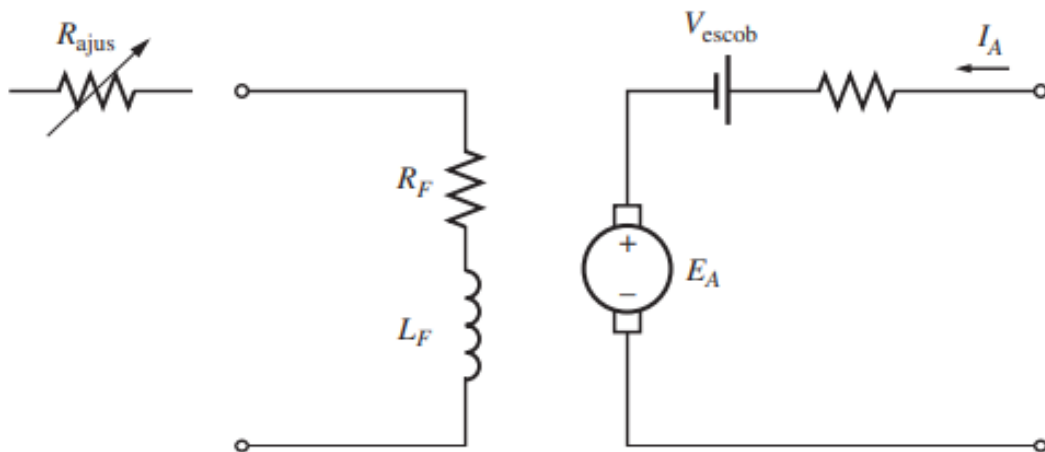
**Tabla 2-2:** Obtención  $K_p$ ,  $T_d$  y  $T_i$  método 2.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente : (Dorf & Bishop, 2005)

## 1.2 Motor DC

Los motores convierten la energía eléctrica suministrada en su entrada en energía mecánica de salida (Maloney, 1983)(Navarro Salas, 2017) de acuerdo con el principio de reciprocidad electromagnética formulado por Faraday y Lenz la misma maquina puede funcionar como motor o como generador, depende únicamente de la dirección del flujo de potencia que circule a través de la misma (Fraile-Mora, 2003), en la Figura 1-12 se observa el circuito equivalente..

**Figura 2-12:** Circuito equivalente a un motor DC.

Fuente:(Chapman, 2012)

En (Chapman, 2012) se definen 5 grandes tipos de motores DC:

- Motor de cd de excitación separada.
- Motor de cd en derivación.

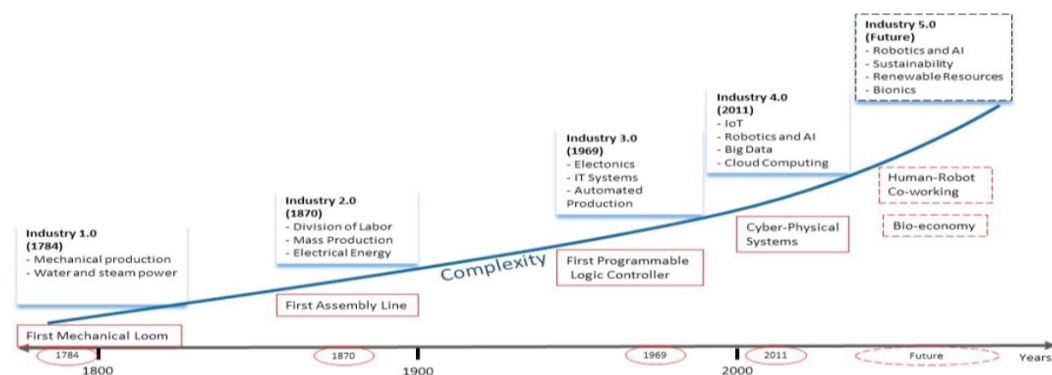
- Motor de cd de imán permanente.
- Motor de cd en serie.
- Motor de cd compuesto

Para el presente caso de estudio interesa los **motores DC de imán permanente** que tienen como característica principal que sus polos están hechos de imanes permanentes, ofrece ciertas ventajas con respecto a los motores de derivación ya que no necesitan de un circuito de campo y como no requieren devanados de compensación pueden ser de tamaño más pequeño. Los motores DC de imán permanente tienen flujo de potencia fijo por lo que no se puede controlar su velocidad por medio de variación de la corriente o flujo de campo. Para ello se utiliza el control de voltaje y el control de resistencia del inducido.

### 1.3 Industria 5.0

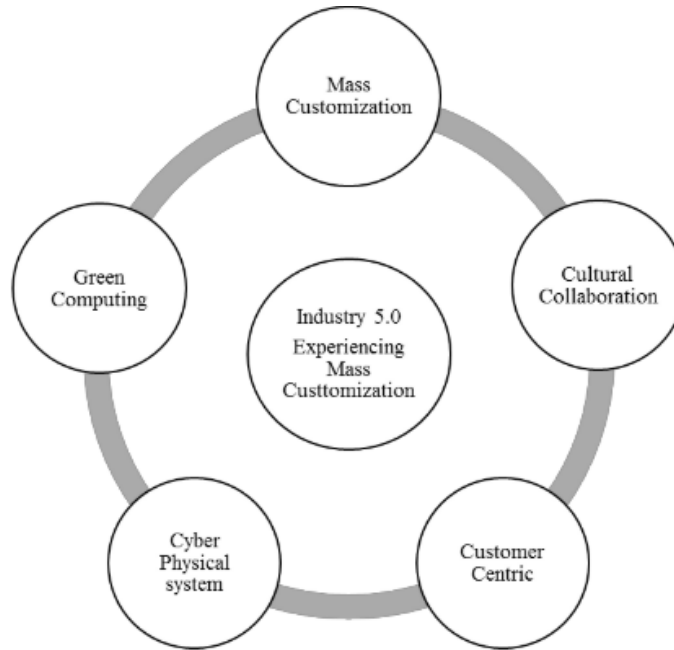
En la actualidad reina el concepto de la industria 4.0, donde lo primordial es aumentar el rendimiento y la producción de los procesos, para tal fin se desarrollan robots capaces de automatizar la mayoría de los procesos en la generación de un producto y en algunos casos la totalidad, pero ante este crecimiento de dar inteligencia a las máquinas dándoles en el proceso mayor autonomía, genera dilemas morales de hasta qué punto se puede permitir esto (Özdemir & Hekim, 2018).

**Figura 2-13:** Desde la industria 1.0 a la 5.0.



Fuente: (Demir et al., 2019)



**Figura 2-14:** Principios de la industria 5.0.

Fuente: (Pathak et al., 2019)

Ante la posibilidad de una hipotética centralización del mundo en torno a los robots, surge en término de la 5 revolución industrial, el objetivo es simple, solo se pretende retornar al humano al “centro del universo” como lo define (Skobelev & Borovik, 2018), para tal objetivo se aprovecha el creciente entrenamiento de los robots con IA, la idea y ejecución actual de inmiscuir el mundo y todos los procesos al IoT, y realizar trabajos conjuntos, donde las decisiones son tomadas por lo humanos pero la mayoría de los procesos y las ideas son generadas por los Robots cooperativos, en la Figura 1-13 se puede observar los principios propuesto de la industria 5.0.

Pero, ¿Qué son los robots cooperativos?, ya se ha definido que es un robot y que funciones cumple, pero no es clara la diferencia entre las funciones un robot actual a los denominados cooperativos. Pues bien, cuando se hace referencia a los robots cooperativos se pretende la incorporación de estos en los entornos de trabajo con humanos, pero que su interacción sea directa, pero para este planteamiento surgen múltiples cuestionamientos entorno al desarrollo del trabajo cooperativo entre humanos y robots, que no distan mucho a los problemas sociales existentes en la actualidad en los entornos de trabajo entre solo humanos. Y son cuestionamiento tales como la posible

discriminación tanto de un sector o el otro, la ética en el trabajo, los niveles de confianza... (ver Tabla 1-3) (Demir et al., 2019).

**Tabla 2-3:** Cuestiones relacionadas con la integración de los robots en las organizaciones.

---

<i>Evolución del comportamiento organizativo</i>
<i>Aceptación de los robots en el lugar de trabajo</i>
<i>Evolución de las estructuras organizativas y los flujos de trabajo</i>
<i>Evolución de la ética del trabajo</i>
<i>Discriminación contra los robots o las personas</i>
<i>Privacidad y confianza en un entorno de trabajo en colaboración entre humanos y robots</i>
<i>Educación y formación</i>
<i>Rediseño de los lugares de trabajo de los robots</i>

---

Fuente: (Demir, 2017)

Uno de los campos donde innovaría la industria 5.0 son los mercados, donde se busca que los productos sean orientados al uso de los humanos/usuarios (Nahavandi, 2019), por lo que se pretende que el modelo empresarial gire en torno a esta idea, aunque suena simple hay muchos retos en este camino, tales como lograr que los productos piensen en la gente en lugar de continuar en la línea actual de solo estar orientados en los avances tecnológico (Aslam et al., 2020).

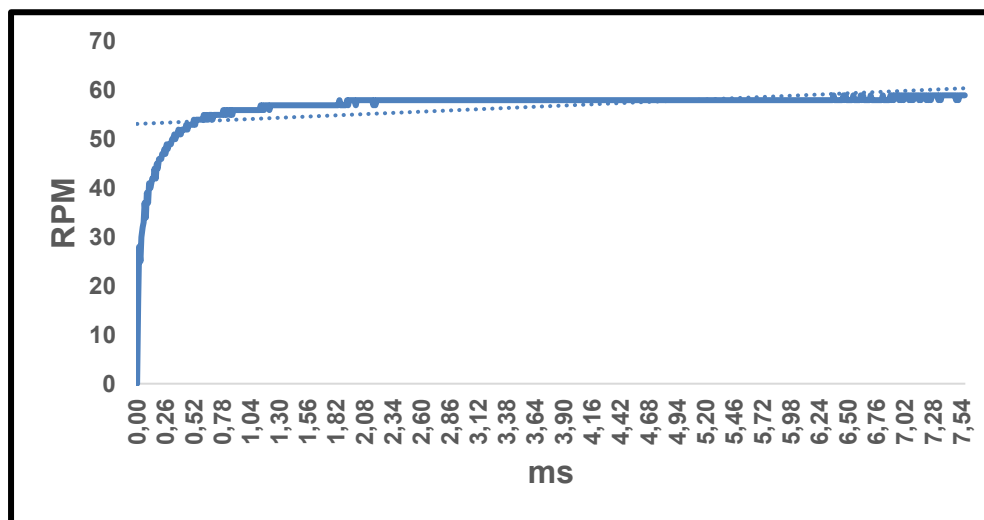
## 2. Controlador

El diseño de un controlador es fundamental para automatizar proceso en general, logrando adicionalmente mayor precisión y eficiencia en este, la mayoría de los procesos en la actualidad están automatizados por sistemas de control, y aunque hay diversos procesos uno de los más comunes es el control PID (Cuero, 2018; Majumdar et al., 2018).

### 2.1 Identificación de la planta

Cuando se desea implementar un sistema de control se hace necesario la identificación de la planta que permitirá modelar el sistema y así poder diseñar el controlador, el primer paso es hallar una función de transferencia característica ajustando el motor a una potencia del 50% tomando datos de las revoluciones por minuto (RPM) a una frecuencia de muestreo de 10ms, el resultado está representado en la Figura 2-1, este proceso es la representación de la respuesta del sistema a una entrada escalón.

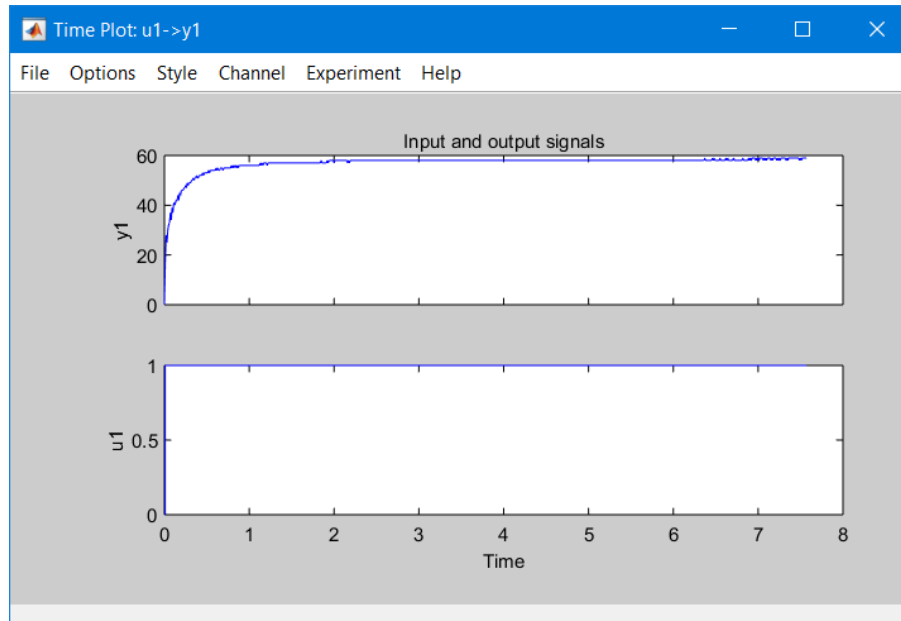
Figura 2-1: Respuesta en RPM del motor al 50%.



Fuente: Elaboración propia con Excel.

Con los datos obtenidos se procede a la identificación de la planta con ayuda de la herramienta Ident de Matlab, allí introduciendo estos datos junto con una entrada de escalón unitario (Figura 2-2), se trata de modelar el sistema a fin de obtener una función de transferencia.

**Figura 2-2:** Señales de entrada y salida para el proceso de identificación de la planta.



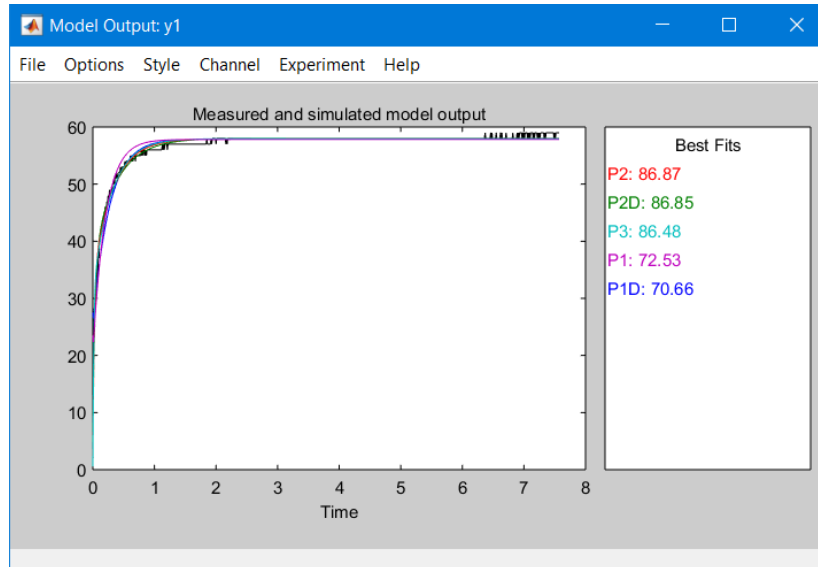
Fuente: Elaboración propia con Ident de Matlab.

Una vez están cargados los datos en Ident se realiza el proceso de modelamiento de los datos, para esto la herramienta presenta un conjunto de opciones, donde se permite seleccionar las características de la función de transferencia que modelara el sistema, dentro de las opciones características principales se permite la selección el número de “polos” o en términos matemáticos el orden de la función, teniendo grado 1, grado 2 o grado 3, aunque a modo de ilustración se seleccionaron todas las características para determinar cuál se ajusta mejor a la planta, pero dado que se conoce que la planta se fundamenta en un motor se tiene el preconcepto que lo más probable es que la función que modelara el sistema es de grado 2.

La ventaja de esta herramienta es que permite seleccionar múltiples configuraciones de modelamiento y graficarlas en un mismo entorno, donde saldrá la representación gráfica y el porcentaje de ajuste con la planta determinada por los datos ingresados, en la Figura 2-3 se observa lo descrito, donde como se suponía previo a la ejecución del modelado la función que más se ajusta es la de grado 2, denotada en la Figura como “P2” con un 86.87% de ajuste a la real, aunque es posible realizar ajuste que logre un mejor porcentaje, se descarta esta alternativa en tanto su utilización requerirá de un incremento

considerable en los recursos de software para realizar el control (Elsrogy et al., 2013; Quimbita & Sandoval, 2018).

**Figura 2-3:** Modelos de salida con porcentaje de ajuste a la planta real.



Fuente: Elaboración propia con Ident de Matlab.

Seleccionando entonces un sistema de segundo grado se obtiene la función de transferencia mostrada en la Figura 2-4, aclarando que esta función de transferencia está en lazo cerrado.

**Figura 2-4:** Función de transferencia de la planta.

$$G(s) = \frac{K_p}{(1+T_{p1}s)(1+T_{p2}s)}$$

with

Kp	=	0.92028
Tp1	=	0.32171
Tp2	=	0.021241

Fuente: Elaboración propia con Matlab.

## 2.2 Diseño del controlador

La planta que entrega Ident es en lazo cerrado y debe trabajarse en lazo abierto para su diseño e interacción en la interfaz de Sisotool, herramienta también de Matlab que permite determinar los valores proporcional, derivativo e integral del controlador PID. La fórmula se convierte de lazo cerrado a abierto por medio de la Ecuación 2-1.

$$G(s) = \frac{num}{den-num} \quad (2-1)$$

Todo el proceso realizado hasta ahora corresponde al modelamiento del sistema con base a la velocidad de los motores (RPM), pero el control que se desea realizar es en función a la posición por tal motivo antes de hacer uso del sintonizador del controlador Sisotool se hace necesario integrar la función de transferencia (ver Ecuación 2-2), para ello simplemente hay que multiplicarla por  $\left(\frac{1}{s}\right)$  (Rairán-Antolines & Fonseca-Gómez, 2011).

$$G(s) = \frac{Kp}{Tp1*Tp2*s^2+(Tp1+Tp2)*s+1-Kp} * \frac{1}{s} \quad (2-2)$$

$$G(s) = \frac{Kp}{Tp1*Tp2*s^3+(Tp1+Tp2)*s^2+(1-Kp)*s} \quad (2-3)$$

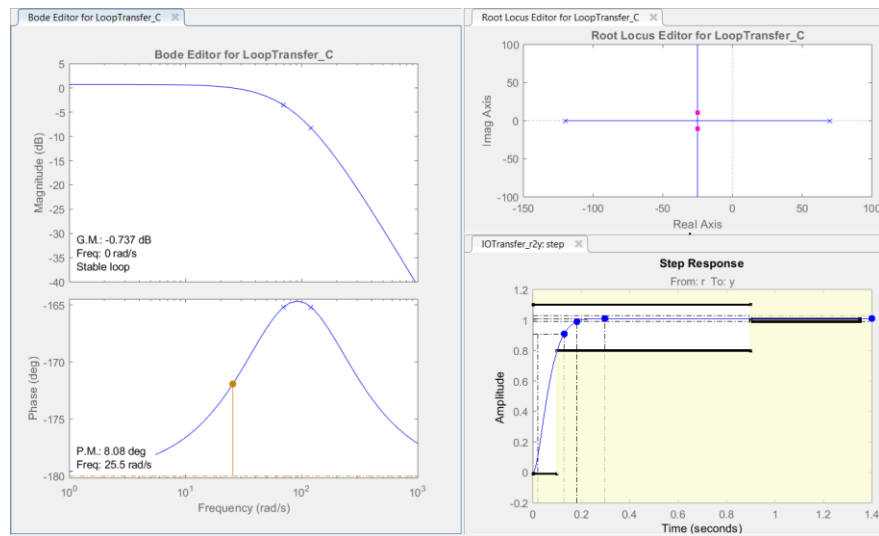
Finalmente, con la obtención de la función de transferencia de la planta (ver Ecuación 2-3) y ajustando un controlador sofisticado para la planta con un buen tiempo de levantamiento, un sobrepaso lo más mínimo posible y un tiempo de establecimiento rápido, se asegura un óptimo control, este proceso requiere de mucha paciencia y en saber seleccionar muy bien los ajustes del controlador, buscando un equilibrio entre el óptimo funcionamiento, junto a los límites del software y hardware.

En el caso del este proyecto se consideró que es fundamental que no hayan oscilaciones, sacrificando un poco el tiempo en el que alcanza el Set Point, soportado en que el tiempo de subida aun así es casi imperceptible para para el ojo humano, a pesar de esta decisión se encontró que el uso de la Aplicación en modo giroscopio se podría ver afectado si se era bastante generosos en ceder en cuanto al tiempo de subida por tal

motivo se hizo necesario de sintonizar en repetidas ocasiones el controlador a fin de encontrar un funcionamiento óptimo de la planta.

En la Figura 2-5 se observa el resultado final de la sintonización del controlador, donde en la gráfica de la respuesta al escalón, se especificaban los criterios de sintonización logrando un tiempo de subida de 0.2 segundos y un tiempo de estabilización de 0.4 segundos, que para efectos prácticos del proyecto fueron seleccionados como óptimos.

**Figura 2-5:** Ventana “Control System Designer” de la herramienta Sisotool de Matlab con el controlador diseñado.



Fuente: Elaboración propia con Matlab.

con el controlador diseñado solo resta determinar los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  que serán los datos que ajustarán el control de los motores con el código implementado en la tarjeta de desarrollo. Para determinar estos valores solo es cuestión de ejecutar el comando “ZPK” en la ventana de comando de Matlab que arrojará lo que se observa en la Figura 2-6.

**Figura 2-6:** Ecuación respuesta arrojada de Matlab con el comando ZPK.

```
Zero/pole/gain from input "Input" to output "Output":
173.844 (z-0.9968) (z-1)
-----
(z-1)
Sampling time: 0.01
```

Fuente: Elaboración propia con Matlab.

Por último, haciendo uso nuevamente de los comandos propios de Matlab, en esta ocasión con el comando "piddata", introduciendo el tiempo de muestreo y la función de transferencia ZPK entrega como respuesta las ganancias de controlador  $K_p$ ,  $T_d$  y  $T_i$ , dando como resultado lo siguiente:

$$K_p = 0.557 \quad (2-4)$$

$$T_i = 6.75 \times 10^{-5} \quad (2-5)$$

$$T_d = 1.74 \quad T_s = 0.01 \quad (2-6)$$



## 3. Comunicación humano-maquina CHM

Con la llegada de la industria 5.0, que como ya se mencionó se centrará en la cooperación entre el hombre y la máquina para la realización de tarea específicas, y además con tecnologías que vayan de la mano con el internet de las cosas se ve la necesidad de unir los dos conceptos y desarrollar formas de comunicación que facilite dicho trabajo mediante protocolos inalámbricos de comunicación.

### 3.1 MQTT

Lo primero es seleccionar un protocolo de comunicación que cumpla con las especificaciones requeridas, en este caso se seleccionó el protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport) que se ha convertido gracias a su fiabilidad y eficiencia en uno de los protocolos más usados en el ámbito de internet de las cosas (IoT) (Yuan, 2017), es un protocolo de comunicación M2M (machine-to-machine), que encuentra en la pila TCP/IP la base para la comunicación, es un servicio de mensajería con patrón publicador/suscriptor, en este tipo de infraestructuras los clientes se conectan a un servidor central denominado bróker que se encarga del redireccionamiento de los mensajes.(Draft & Draft, 2013), el ciclo de comunicación se reduce a tres paso:

- El cliente se conecta al bróker. Puede suscribirse a cualquier "tema" de mensajería del bróker.
- El cliente publica los mensajes en un tema, enviando el mensaje y el tema al bróker.
- Después, el bróker remite el mensaje a todos los clientes que se suscriben a este tema.

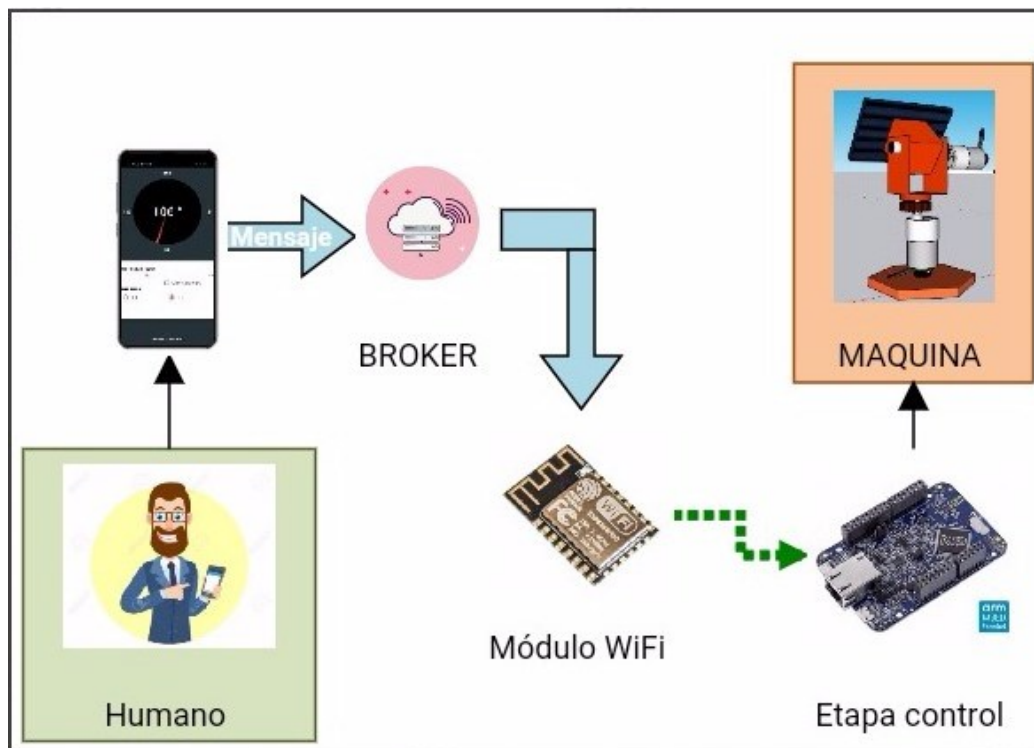
MQTT ofrece ventajas como diferentes tipos de calidad de servicio, encriptación de mensajes y es muy óptimo para redes con ancho de banda limitado.

## 3.2 Hardware y software

Una vez seleccionado el protocolo de comunicación a utilizar lo siguiente es seleccionar los componentes que harán parte del sistema de comunicación general, así como la implementación del software necesario para el intercambio de datos.

En la Figura 3-1 se observa todos los componentes que hacen parte del sistema de comunicación desde el usuario hasta la máquina. La selección de los datos a enviar la realiza el usuario a través de una aplicación móvil conectada a internet, luego de elegir los datos requeridos se envían mediante el protocolo MQTT y el bróker se encarga de redirigirlos hacia un módulo WiFi que se encarga de recibir los datos y compartirlos con la tarjeta encargada de la etapa de control, para finalmente accionar la maquina según los requerimientos asignados por el usuario.

**Figura 3-1:** Esquema de comunicación.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.1 Aplicación Android

Para el desarrollo de la aplicación móvil se utilizó el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial para la implementación de aplicaciones del sistema operativo Android. Android Studio está basado en IntelliJ IDEA, además de tener un potente editor de códigos y las herramientas para desarrolladores propias de IntelliJ, ofrece muchas más funciones que aumentan la productividad al desarrollar apps para Android. (Guía de usuario, n.d.)

**Figura 3-2:** Interfaz de la aplicación diseñada.

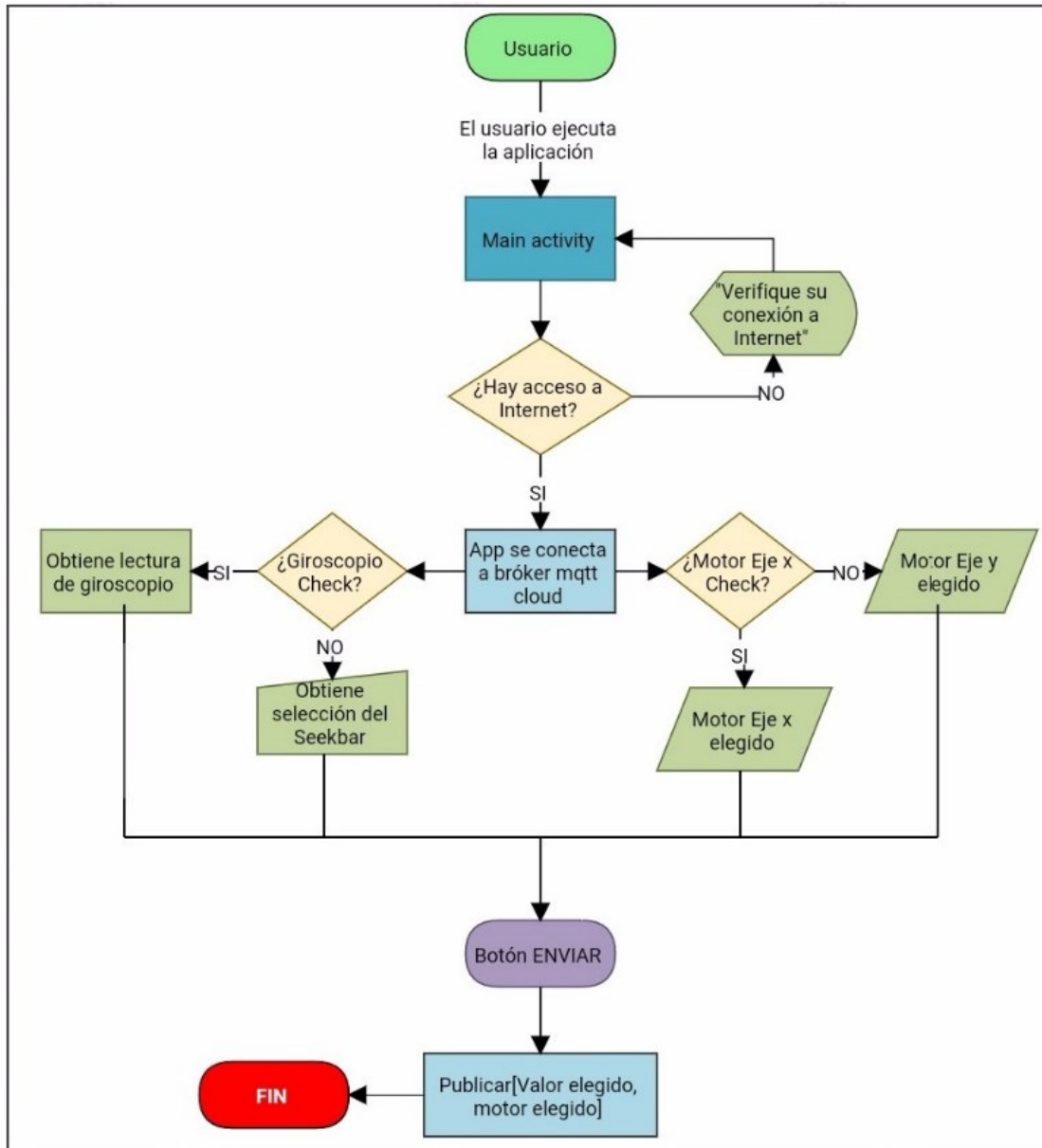


Fuente: Elaboración propia con Android Studio.

En la Figura 3-2 se ve la interfaz de la aplicación desarrollada, la elección de los grados de referencia es posible hacerla manualmente mediante la herramienta seekbar o activar el giroscopio que comúnmente traen internamente la mayoría de dispositivos móviles, esta elección se ve en el gráfico de arriba que hace las veces de motor. Para elegir que

motor será seleccionado se optó por la herramienta radiobutton y finalmente luego de seleccionar los datos requeridos el button enviar los publicara para su posterior utilidad.

**Figura 3-3:** Diagrama de flujo de la aplicación.



Fuente: Elaboración propia con aplicación Android "Flowdia Lite"

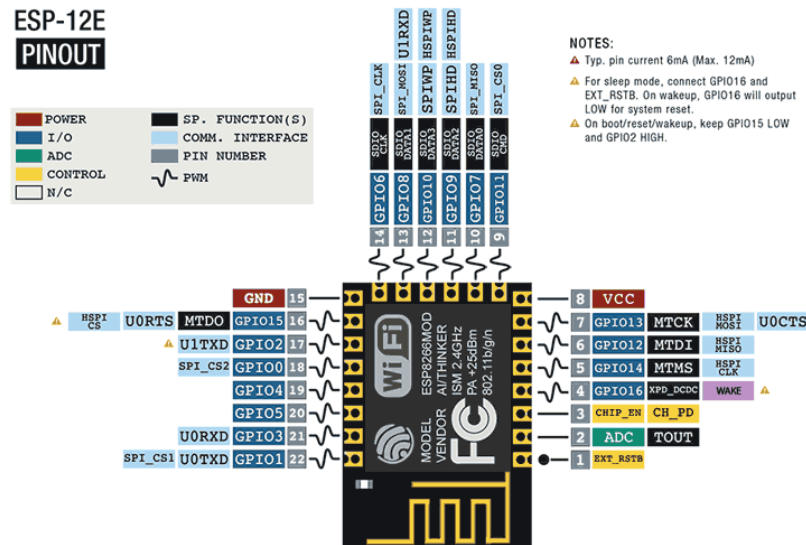
La Figura 3-3 es un diagrama de flujo donde se ve representado el algoritmo lógico utilizado en el desarrollo de la aplicación. Como se ve luego de que el usuario ejecuta la aplicación, lo primero es comprobar que el dispositivo se encuentra conectado a una red de internet, luego de esta verificación se lleva a cabo la conexión del dispositivo al bróker

utilizando los datos de acceso del mismo, lo siguiente es verificar las opciones y datos introducidos por el usuario por el usuario, si se activa el giroscopio se hace la lectura del mismo para obtener el dato y si no, simplemente se toma el dato mediante la herramienta seekbar, así mismo se verifica que motor es seleccionado para realizar la tarea y por ultimo al pulsar el botón de enviar se publica los datos mediante el método publicar en el tema o topic correspondiente, tanto el valor de referencia como la información del motor elegido.

### 3.2.2 Modulo WiFi

Para la recepción de los mensajes enviados desde la aplicación se utilizó el módulo ESP12E que cuenta con el SoC ESP8266 que es un chip WiFi con gestión de pila TCP/IP (Shenzhen Anxinke Technology CO;LTD, 2015). En la Figura 3-4 se encuentra el pinout del módulo.

Figura 3-4: PINOUT ESP12E

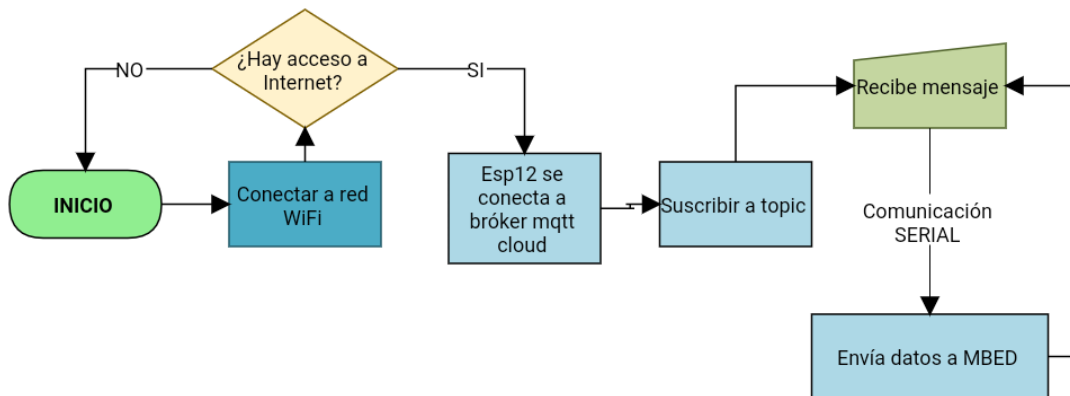


Fuente: <https://www.luisllamas.es/wp-content/uploads/2018/05/esp8266-esp12e-pinout.png>

En la Figura 3-5 se muestra el flujograma del script diseñado sobre la ESP12E para la recepción de los datos. Lo primero es realizar la conexión del dispositivo a una red WiFi mediante los datos de acceso de la misma y verificar la existencia del servicio de internet, para luego conectarse al bróker en la nube y posteriormente suscribirse al tema donde es enviado el mensaje, inmediatamente después de que cualquier dispositivo envíe un

mensaje a dicho topic el módulo lo recibe y finalmente se envía mediante comunicación serial a la tarjeta de desarrollo Mbed donde se llevara a cabo la etapa de control.

**Figura 3-5:** Diagrama de flujo del algoritmo de la ESP12E.



Fuente: Elaboración propia con aplicación Android “Flowdia Lite”

Mas adelante se describirá el dispositivo seleccionado para la etapa de control.

## 4. Implementación del prototipo

La tarjeta de desarrollo seleccionada para realizar los procesos de control, comunicación y posterior envío de los datos tratados y empaquetados, para el almacenamiento en bases de datos fue la Mbed FRDM-K64F (Figura 4-1), que es una tarjeta desarrollada por NXP en colaboración con Mbed, pensada en satisfacer los requerimientos para prototipos que busquen un equilibrio óptimo entre el costo y el rendimiento, tiene un procesador ARM® Cortex®-M4 core de 32 bits, 1MB Flash, y 256KB de memoria RAM junto con un acelerómetro FXOS8700CQ (*FRDM-K64F* | Mbed, n.d.; Lee et al., 2017).

**Figura 4-1:** Tarjeta de desarrollo FRDM-K64F.

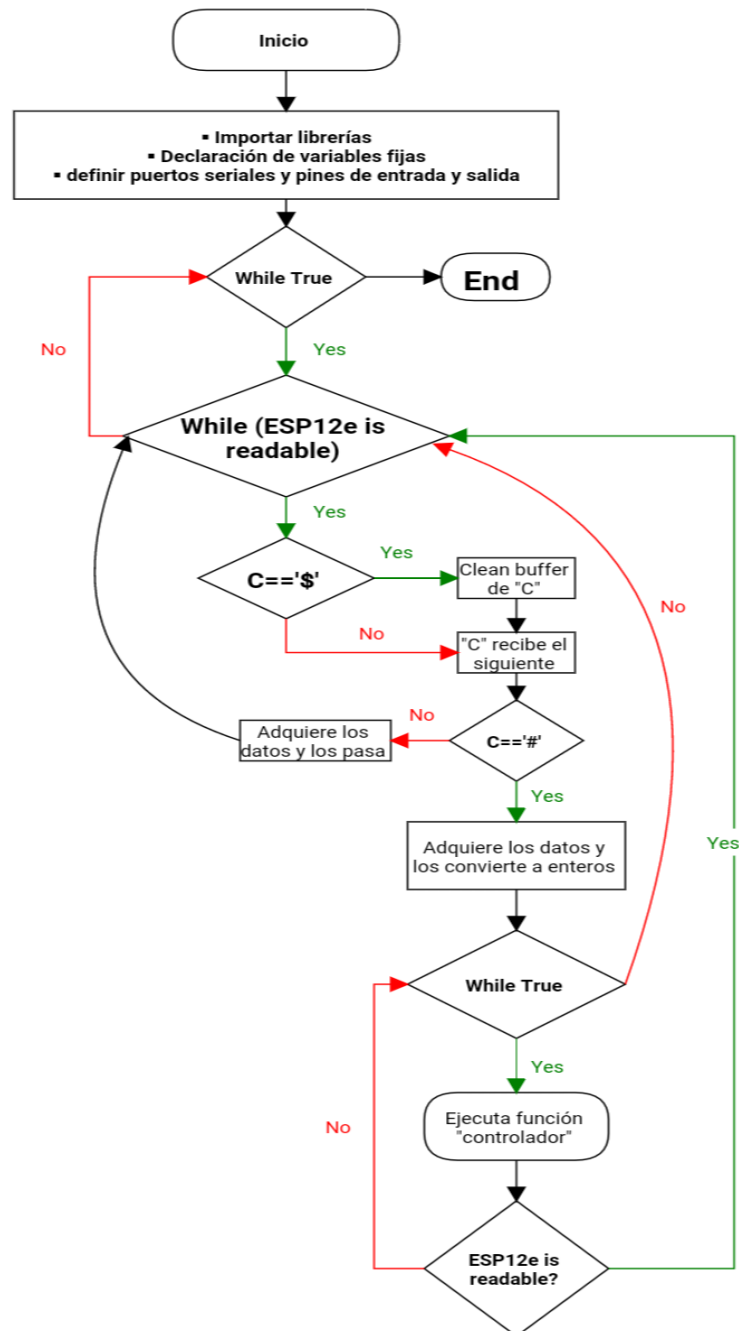


Fuente:

[https://os.mbed.com/media/cache/platforms/FRDM-](https://os.mbed.com/media/cache/platforms/FRDM-K64F_400x300_WO6GnVU_pbSTpt6.png.250x250_q85.png)

[K64F\\_400x300\\_WO6GnVU\\_pbSTpt6.png.250x250\\_q85.png](https://os.mbed.com/media/cache/platforms/FRDM-K64F_400x300_WO6GnVU_pbSTpt6.png.250x250_q85.png)

Con todos los procesos definidos se procedió a realizar el algoritmo que conecte cada uno de los procesos y de funcionalidad al sistema, en el diagrama mostrado en la Figura 4-2, se muestra el esquema general del algoritmo, donde se establecen los procesos de declarar variables, importar librerías y habilitar los periféricos para que se puedan recibir los datos provenientes del módulo ESP12e.

**Figura 4-2:** Diagrama de flujo algoritmo general del sistema.

Fuente: Elaboración propia con aplicación Android "Flowdia Lite"

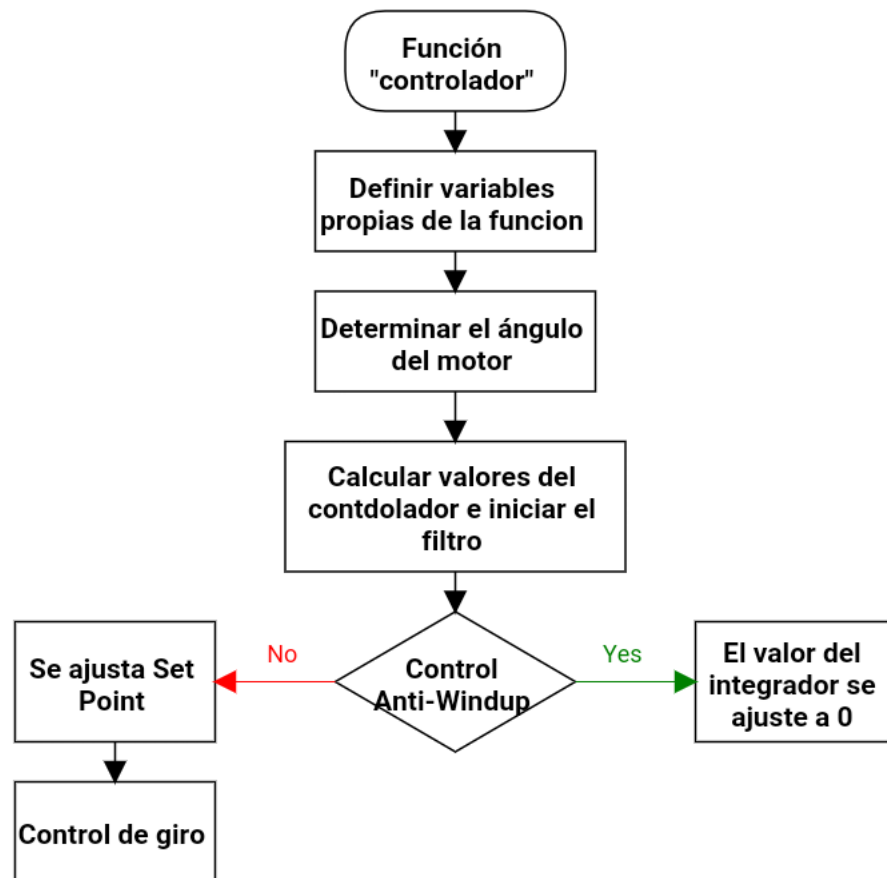
El algoritmo (ver Figura 4-2) en general es muy simple se ejecuta un ciclo infinito, el cual solo es interrumpido a causa de un fallo del sistema, sobre este ciclo constantemente se consulta al puerto serial si hay un dato entrante disponible, de haberlo se lee el dato y se almacena en una variable que será el Set Point para el controlador. Uno de los retos que



se encontraron en esta etapa de comunicación fue la sincronización de los datos de entrada, por tal motivo en la cadena de envió se introdujeron caracteres especiales para indicar cuando empieza y termina el mensaje.

Con los datos guardados en variables se ingresa en la función del controlador, y este ciclo se alternará conforme ingrese un nuevo dato proveniente del puerto serial, la razón de esta interrupción es actualizar en tiempo real cualquier cambio específicamente cuando se usa la aplicación en modo giroscópico, que con el mínimo movimiento de debe ver reflejado en el sistema de motores.

**Figura 4-3:** Diagrama de flujo función del controlador.



Fuente: Elaboración propia con aplicación Android "Flowdia Lite"

En la Figura 4-3 se observa la secuencia lógica del controlador, en esta función se tienen 3 procesos que generan un interés particular, el primero es el ajuste y mapeo de los

datos entregados por parte del encoder para determinar la posición del rotor del motor, es decir el ángulo en el que se encuentra la referencia, aunque el proceso no requiere muchos procesos su importancia radica en determinar las características propias de cada encoder, esto fue posible determinarlo al encontrar diferencias en los datos entre los dos motores evaluados, que a pesar de ser comprados en el mismo sitio y tienen la misma referencia no sucedió así con el ajuste del encoder.

El segundo proceso si tiene gran importancia en el funcionamiento del sistema, resulta que cuando se implementó el controlador en las primeras pruebas, se obtuvo que había una oscilación remanente al momento de buscar el punto de referencia, para dar solución a este problema se hizo necesario de incluir un control de Anti-Windup, que no es más que suprimir la sobre oscilación final, ajustando el integrador a 0 (Yao et al., 2017).

El tercer proceso y ultimo a destacar es el de garantizar el cruce por cero, cuando se habla del cruce por cero se hace referencia al momento en el que el sensor identifica que el rotor cruza por  $0^\circ$  bien sea hacia adelante o hacia atrás, la razón de mencionar este proceso es que en el proceso lógico del controlador asume que  $0^\circ$  es el punto de partida y  $360^\circ$  es el punto final, pero en realidad estos dos puntos son el mismo, para dar solución a este inconveniente se hizo necesario de realizar un algoritmo que entienda cuando se ha completado un giro en cualquiera de los dos sentidos, al identificar este proceso se reinicie la variable que almacena esta información.

Con todo el desarrollo lógico listo se desarrolla el esquema que dará vida al prototipo y será fundamental para la realización de pruebas de funcionamiento al controlador a los procesos de estudio, como la comunicación entre la aplicación Android con la tarjeta de desarrollo y el almacenamiento de los datos en una base de datos que serán referencia para trabajos futuros.

El sistema este compuesto por un par de motorreductores DC con encoder (ver Figura 4-3), la razón del requerimiento del encoder es facilitar la adquisición de datos provenientes del motor de manera digital, esto ayudara en el manejo de los datos para la implementación del controlador y así hacer el sistema óptimo.

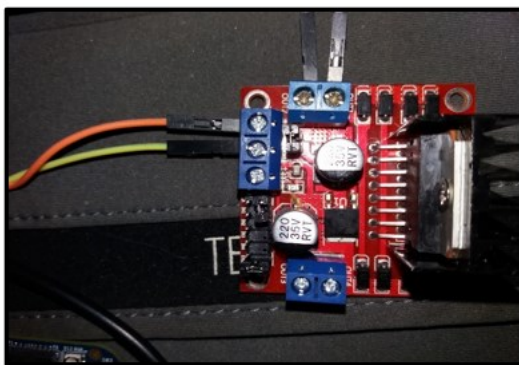
**Figura 4-4:** Motorreductor DC con encoder.



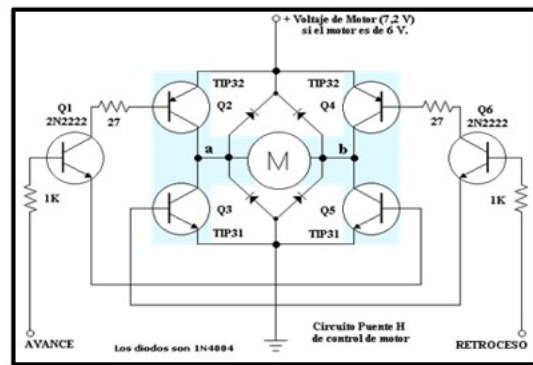
Fuente: [https://naylampmechatronics.com/2306-large\\_default/motor-dc-con-encoder-y-caja-reductora-25ga-12v-350rpm.jpg](https://naylampmechatronics.com/2306-large_default/motor-dc-con-encoder-y-caja-reductora-25ga-12v-350rpm.jpg)

Se empleó el circuito integrado L298N (Figura 4-4 a) para el control de giro (derecha/izquierda) del motor DC ubicado en la parte superior de la estructura. Este módulo es de gran utilidad debido a que reemplaza el puente H elaborado manualmente ahorrando gran cantidad de espacio y costos. En etapas tempranas del desarrollo del proyecto se implementó un puente H diseñado por los autores, pero se hizo necesario para aumentar la potencia realizar un cambio donde se empleó en lugar de los transistores 2n2222 especificados en la Figura 4-4 b, un par de transistores NPN TIP31C sin resistencia en el colector. Con el integrado L298N no fue necesario este arreglo

**Figura 4-5:** a. Circuito integrado L298N, b. Circuito puente H.



a.



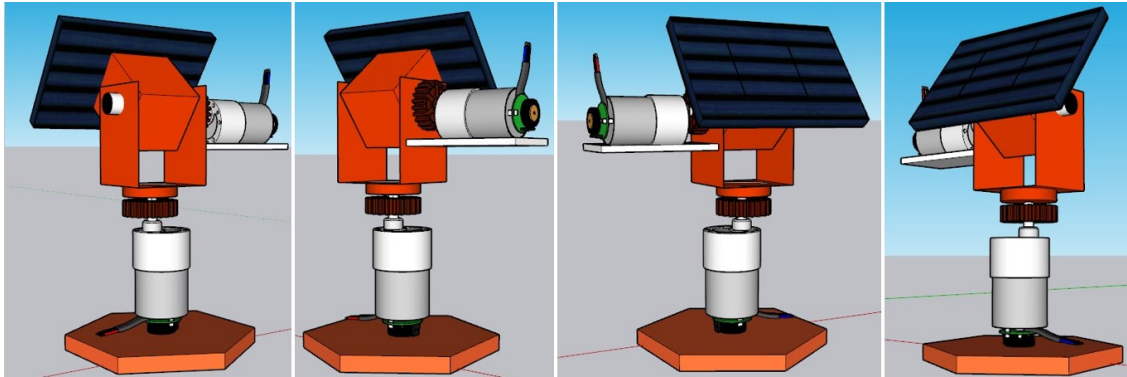
b.

Fuente: a. Elaboración propia. b. [http://robots-argentina.com.ar/img/MotorCC\\_PuenteH.gif](http://robots-argentina.com.ar/img/MotorCC_PuenteH.gif)

En la Figura 4-6 se muestra el esquema físico final, donde se ubica uno de los motores pegado a la base, permitiendo que el sistema realice un ajuste de posición angular en los 360 grados con respecto a la paralela al suelo, sobre este motor se colocó un segundo

motor que habilita el giro perpendicular al suelo logrando con este sistema completo una cobertura de movimiento total del espacio. El objeto de movimiento de prueba fue una celda fotovoltaica de baja potencia para proporcionar una fuerza de torque necesaria para que el sistema de control se ajuste de mejor manera al funcionamiento real.

**Figura 4-6:** Montaje del prototipo.



Fuente: Elaboración propia con SketchUp.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

Durante la ejecución de este proyecto se estableció que hay una gran importancia en el uso cooperativo de los robots con los humanos, dado que el manejo automatizado de los procesos tiende a limitarse a lo preestablecido y no es posible un ajuste rápido para nuevas metodologías que vayan surgiendo conforme se establezcan nuevas teorías para tal proceso.

Es por este motivo que la idea propuesta por la industria 5.0 permite dar solución a este inconveniente, en primera medida si se supone un proceso donde la maquina se encarga una etapa autónoma que difícilmente ha de ser modificada con el tiempo, como por ejemplo una etiquetadora, junto con la colaboración cognitiva de un operador que será capaz de indicarle un cambio en el ángulo de etiqueta. Este proceso reiterativo hará que con el uso de métodos de inteligencia artificial dicha etiquetadora más adelante realizara el proceso de ajuste sin necesidad de supervisión exhaustiva que a la par ira proporcionando más datos de funcionamiento para poco a poco ir desarrollando más información útil para adaptarse a nuevos retos.

En cuanto al diseño del prototipo, se establecido que el proceso implementado es poco propenso a fallos y como primera etapa para el objetivo futuro que es la adaptación de este tipo de procesos a la nueva revolución industrial es una muy buena opción, si bien el diseño fue realizado a nivel de prototipo con motores pequeños y tarjetas de desarrollo óptimas para tal fin, se espera que con la implementación del mismo sistema a escala mayor siguiendo el procedimiento descrito en el presente trabajo tenga también resultados satisfactorios.

### **5.2 Recomendaciones**

Se propone que en trabajos futuros se puede implementar el mismo diseño, pero con la implementación de un controlador realizado con redes neuronales (Lee et al., 2017), tomando como base los datos obtenidos por pruebas realizados con el sistema desarrollado en este proyecto, aunque de ser posible lograr la implementación en una

aplicación real sería el proceso ideal para lograr mejores resultados. Dentro de los aplicativos propuestos en este trabajo se permite sugerir realizar el direccionamiento en dos ejes para un sistema de paneles fotovoltaicos a fin de mejorar la eficiencia en generación de los mismos.

De igual manera se plantea la opción de identificar los factores sobre los cuales podría trabajar el prototipo propuesto en la implementación de automatizar el posicionamiento de los arreglos de paneles en un sistema fotovoltaico, bajo el concepto de industria 5.0, en donde se integre el control automatizado con la cooperación en la toma de decisiones del sistema con el usuario, un ejemplo mas específico sería que a partir de la recolección de información el sistema automatizado le sugiera distintos modos de operación conforme a las probabilidades de ocurrencia, en tanto a la generación esperada para determinado día, acompañado a los perfiles de consumo que tenga el hogar, así sería un trabajo final en equipo donde el usuario sigue alimentando de información al robot y este a su vez sugiere procesos óptimos de trabajo.

## Bibliografía

- Aslam, F., Aimin, W., Li, M., & Rehman, K. U. (2020). Innovation in the era of IoT and industry 5.0: Absolute innovation management (AIM) framework. *Information (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/info11020124>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*.
- Benjamin-c-kuo. (1996). *sistemas de control automatico*.
- Carlos, R. J. G., Ramirez, J. L., & Lancheros-Cuesta, D. (2017). Control de posición de motor DC por medio de espacio de estados para plataforma rotativa. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI*. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2017.7975741>
- Chapman, S. J. (2012). *Maquinas electricas*.
- Cova, W. J. D. (2005). *Control Pid Un Enfoque Descriptivo*. 45.
- Cuero, J. (2018). *Prototipo para modelar y controlar un motor DC Prototype for modeling and controlling a DC motor*. 12(1), 65–72. <https://doi.org/10.14483/22484728.13754>
- Demir, K. A. (2017). Research Questions in Roboethics. *Mugla Journal of Science and Technology, December 2017*, 160–165. <https://doi.org/10.22531/muglajsci.359648>
- Demir, K. A., Döven, G., & Sezen, B. (2019). Industry 5.0 and Human-Robot Co-working. *Procedia Computer Science*, 158, 688–695. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104>
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). Sistemas de Control Moderno. In *Pearson Educación S.A.: Vol. 10 ed.* (pp. 1–6).
- Draft, C. S., & Draft, P. R. (2013). *MQTT*. July, 1–63.
- Durdu, A., & Dursun, E. H. (2019). Sliding mode control for position tracking of servo system with a variable loaded DC motor. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 25(4), 8–16. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.25.4.23964>
- Elsrogy, W. M., Fkirin, M. A., & Hassan, M. A. M. (2013). Speed control of DC motor using PID controller based on Matlab. *2013 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2013*, 4(6), 196–201. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2013.6689543>
- Ferheen, A., & Chidambaram, M. (2017). DESIGN OF ROBUST PID CONTROLLER. *2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)*, 1–7.
- Fernando Firmino. (2014). *Estudo Comparativo de Métodos de Sintonia de Controladores PID*. 90.

- Fraile-Mora, J. (2003). *Máquinas Eléctricas - Jesús Fraile Mora (5ta Edición).pdf*.  
*FRDM-K64F | Mbed*. (n.d.). Retrieved April 21, 2020, from  
<https://os.mbed.com/platforms/FRDM-K64F/>
- Guia de usuario. (n.d.). *Introducción a Android Studio | Desarrolladores de Android*.  
Retrieved May 21, 2020, from <https://developer.android.com/studio/intro?hl=es-419>
- Lee, J., Stanley, M., Spanias, A., & Tepedelenioglu, C. (2017). Integrating machine learning in embedded sensor systems for Internet-of-Things applications. *2016 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2016*, 290–294. <https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2016.7886051>
- Majumdar, J., C Gupta, S., & Prassanna Prasath, B. (2018). Linear and Non-Linear Control Design of Skid Steer Mobile Robot on an Embedded. *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 7(3), 185.  
<https://doi.org/10.11591/ijra.v7i3.pp185-196>
- Maloney, T. J. (1983). *Electronica Industrial Dispositivos y Sistemas* (p. 586).
- Martín Rodríguez, J. A. (2012). *Sistema de posicionado angular automatizado , configurado y sincronizable para muestras de hormigón*.
- Mayor, U., & Andres, D. E. S. A. N. (2001). *Apuntes de control pid*.
- Miawarni, H., Setyawan, D. E., Setijadi, E., Hidayat, M. M., & Sumpeno, S. (2018). Tracking antenna system design for DVB-T2 set top box based on fuzzy inference system. *Proceedings of 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Smart Technology for Better Society, ICITEE 2018*, 214–219. <https://doi.org/10.1109/ICITEED.2018.8534838>
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0-a human-centric solution. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Narendra, A., Naik, N. V. R., Panda, A. K., & Tiwary, N. (2019). A Real Time Implementation of PV Driven DC Motor along with Wireless Control. *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2019*, 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.8944779>
- Natalia, E., Mendoza, A., Fernando, W., & Suarez, B. (2016). Prototype for Automatic Orientation of Solar Panels. *Revista Publicaciones e Investigación*, 11, 103–111.
- Navarro Salas, R. (2017). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia - Google Books*.  
<https://books.google.com.co/books?id=ehxKXip1j6EC&printsec=frontcover&dq=maquinas+electricas&hl=es->



- 419&sa=X&ved=0ahUKEwi26K6m5MnOAhVFGx4KHaduADkQ6AEIMjAC#v=onepage&q=maquinas electricas&f=false
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderno*.
- Özdemir, V., & Hekim, N. (2018). Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, “the Internet of Things” and Next-Generation Technology Policy. *OMICS A Journal of Integrative Biology*, 22(1), 65–76.  
<https://doi.org/10.1089/omi.2017.0194>
- Pardo, C. (n.d.). *Controlador PID - Control Automático*. Retrieved May 21, 2020, from <https://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>
- Pathak, P., Pal, P. R., Shrivastava, M., & Ora, P. (2019). Fifth revolution: Applied AI & human intelligence with cyber physical systems. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(3), 23–27.
- Quimbita, C., & Sandoval, E. (2018). *CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC, UTILIZANDO CONTROLADORES PID*. Escuela Politécnica Nacional.
- Rairán-Antolines, J. D., & Fonseca-Gómez, J. M. (2011). Doble lazo de control para regular la posición y la velocidad en un motor de corriente directa. *Ingeniería y Universidad*, 15(2), 337–357.
- Shenzhen Anxinke Technology CO;LTD. (2015). *ESP-12E WiFi Module*.
- Skobelev, D. S. P. O., & Borovik, D. S. S. Y. (2018). ON THE WAY FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUSTRY 5.0: FROM DIGITAL MANUFACTURING TO DIGITAL SOCIETY. In *International Scientific Journal I N D U S T R Y 4 . 0* (Issue 5, pp. 307–311).
- Vilanova, R. (2011). *Tutorial Control PID robusto : Una visi ´ on panor ´ amica*. 8, 141–158. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.06.003>
- Yao, X., Guo, L., Wu, L., & Dong, H. (2017). Static anti-windup design for nonlinear Markovian jump systems with multiple disturbances. *Information Sciences*, 418–419, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.08.006>
- Yuan, M. (2017). *Conociendo MQTT*. <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/iot-mqtt-why-good-for-iot/index.html>
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M. G., & Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/pr7010036>