



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

TEMA:

**Implementación de métodos matemáticos para la ingeniería en  
sistemas de control eléctrico usando MatLab/Simulink**

AUTOR:

Flores Poveda, Miguel Ángel

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título

**INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO**

TUTOR:

Romero Rosero, Carlos Bolívar

Guayaquil, Ecuador

22 de septiembre del 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.  
**Flores Poveda, Miguel Ángel** como requerimiento para la obtención del  
título de **INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO**.

TUTOR

---

Romero Rosero, Carlos Bolívar

DIRECTOR DE CARRERA

---

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 22 del mes de septiembre del año 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Flores Poveda, Miguel Ángel**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “**Implementación de métodos matemáticos para la ingeniería en sistemas de control eléctrico usando MatLab/Simulink**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero Eléctrico Mecánico**, 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 Titulación referido.

Guayaquil, a los 22 del mes de septiembre del año 2017

EL AUTOR

---

Flores Poveda, Miguel Ángel



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Flores Poveda, Miguel Ángel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Implementación de métodos matemáticos para la ingeniería en sistemas de control eléctrico usando MatLab/Simulink”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 22 del mes de septiembre del año 2017

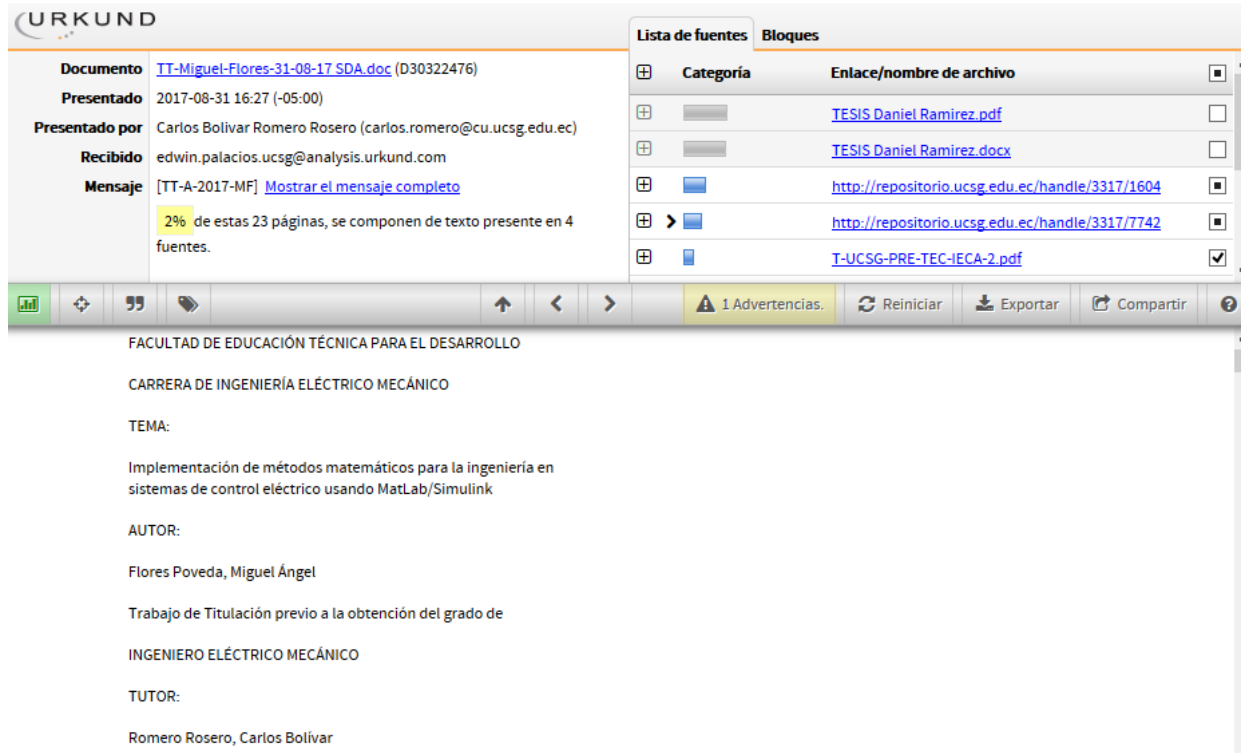
EL AUTOR

---

Flores Poveda, Miguel Ángel

## REPORTE DE URKUND

Informe del Trabajo de Titulación de la Carrera de Ingeniería Eléctrico Mecánica, con **2%** de coincidencias perteneciente al estudiante, **FLORES POVEDA MIGUEL ANGEL**.



The screenshot displays the URKUND interface. On the left, a sidebar shows document details: **Documento**: TT-Miguel-Flores-31-08-17 SDA.doc (D30322476); **Presentado**: 2017-08-31 16:27 (-05:00); **Presentado por**: Carlos Bolivar Romero Rosero (carlos.romero@cu.ucsg.edu.ec); **Recibido**: edwin.palacios.ucsg@analysis.urkund.com; **Mensaje**: [TT-A-2017-MF] [Mostrar el mensaje completo](#). A yellow highlight indicates that 2% of the 23 pages consist of text from 4 sources.

On the right, a table titled 'Lista de fuentes' lists the sources:

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	<a href="#">TESIS Daniel Ramirez.pdf</a>
	<a href="#">TESIS Daniel Ramirez.docx</a>
	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1604">http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1604</a>
	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7742">http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7742</a>
	<a href="#">T-UCSG-PRE-TEC-IECA-2.pdf</a>

Below the table, the document content is displayed:

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO  
TEMA:  
Implementación de métodos matemáticos para la ingeniería en sistemas de control eléctrico usando MatLab/Simulink  
AUTOR:  
Flores Poveda, Miguel Ángel  
Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de  
INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO  
TUTOR:  
Romero Rosero, Carlos Bolivar

Atte.

Ing. Carlos Romero Rosero  
Profesor Titular Principal – Tutor.

## **DEDICATORIA**

A mi madre por su amor, paciencia y enseñanza, mi padre por ser mi ejemplo a seguir y su gran cariño mostrado, mis hermanas por el gran aprecio mostrado, mi esposa gracias por estar batallando día a día.

## **AGRADECIMIENTO**

Al que está arriba ayudándome.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

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

**ING. MIGUEL ARMANDO HERAS SÁNCHEZ, M.Sc.**  
DIRECTOR DE CARRERA

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

**ING. LUIS ORLANDO PHILCO ASQUI, M.Sc.**  
COORDINADOR DE ÁREA

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

**ING. DANIEL ENRIQUE CAMPOVERDE CARDENAS, M.Sc.**  
OPONENTE



## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Resumen .....	XIV
CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación .....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Antecedentes del problema a investigar. ....	16
1.3. Definición del problema a investigar.....	17
1.4. Justificación del problema a investigar.....	17
1.5. Objetivos del problema a investigar. ....	18
1.5.1. Objetivo General.....	18
1.5.2. Objetivos específicos:.....	18
1.6. Hipótesis.....	19
1.7. Metodología de Investigación.....	19
CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica. ....	20
2.1. ¿Qué es un Sistema?.....	20
2.2. ¿Qué es un Sistema de Control? .....	20
2.3. Descripción general de sistemas de control en ingeniería. ....	23
2.4. Clasificación de los sistemas de control.....	23
2.4.1. Sistemas de control lineal y no lineal.....	24
2.4.2. Sistemas variantes e invariantes en el tiempo.....	27
2.4.3. Sistema de control de tiempo continuo y discreto.....	28
2.4.4. Sistema de bucle o lazo abierto.....	29
2.4.5. Sistema de bucle o lazo cerrado.....	31
2.5. Aplicaciones del uso de sistemas de control retroalimentados. ....	34
2.5.1. Aplicación de control de dirección asistida en automóviles. ....	35
2.5.2. Aplicación de un sistema de control de realimentación negativa.....	36
2.5.3. Aplicación de sistemas de control en la industria energética.....	36
2.6. Fundamentos de programación en MatLab.....	38

2.6.1. Sentencias de control de flujo.....	38
2.6.2. Gráficos en MatLab. ....	40
2.7. Modelado en la plataforma Simulink. ....	44
CAPÍTULO 3: Modelado en MatLab/Simulink. ....	48
3.1. Aplicación práctica del diseño de un controlador PID. ....	48
3.1.1. Descripción general del controlador PID. ....	48
3.1.2. Simulación del controlador PID usando MatLab.....	49
3.1.3. Simulación del controlador PID usando Simulink. ....	53
3.2. Aplicación práctica del sistema de control de velocidad.....	58
3.3. Aplicación práctica del modelado de un motor de corriente directa. ....	61
CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones. ....	74
4.1. Conclusiones.....	74
4.2. Recomendaciones.....	75
Bibliografía.....	76

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 1. 1: Sistema gobernador de esferas..... 15

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama de bloques de un sistema académico. .... 21

Figura 2. 2: Diagrama de bloques del sistema económico de un país..... 21

Figura 2. 3: Diagrama de bloques del control de velocidad de motor eléctrico.  
..... 21

Figura 2. 4: Diagrama de bloques del control de un montacargas o grúa  
hidráulica. .... 22

Figura 2. 5: Diagrama de bloques del control para elevación de aeronaves.22

Figura 2. 6: Circuitos eléctrico básico que representa a un sistema lineal... 25

Figura 2. 7: Respuesta del sistema lineal para una red resistiva..... 25

Figura 2. 8: Circuitos electrónico unipolar que representa a un sistema no  
lineal. .... 26

Figura 2. 9: Respuesta a un sistema no lineal. .... 26

Figura 2. 10: Sistema invariante en el tiempo..... 27

Figura 2. 11: Sistema variante en el tiempo..... 27

Figura 2. 12: Representación gráfica de señales de tiempo continuo..... 29

Figura 2. 13: Representación gráfica de señales de tiempo discreto..... 29

Figura 2. 14: Diagrama de bloques del dispositivo de calentamiento de agua.  
..... 30

Figura 2. 15: Diagrama de bloques de un sistema de control de bucle  
cerrado..... 33

Figura 2. 16: Diagrama de bloques del sistema de control de dirección de  
automóviles..... 35

Figura 2. 17: Comportamiento real de la dirección de desplazamiento deseada. ....	35
Figura 2. 18: Diagrama de bloques del sistema de retroalimentación que representa un sistema básico de control de bucle cerrado. ....	36
Figura 2. 19: Diagrama de bloques del sistema de. ....	37
Figura 2. 20: Gráfica correspondiente de $y = e - at\cos\beta t$ . ....	41
Figura 2. 21: Gráfica correspondiente de la función stem. ....	42
Figura 2. 22: Gráfica correspondiente a la combinación de dos funciones. ..	43
Figura 2. 23: Gráfica 3D discreta utilizando la función stem. ....	44
Figura 2. 24: Ventana principal de la librería de la plataforma Simulink. ....	45
Figura 2. 25: Librería de bloques de operadores continuos (continuous). ...	46
Figura 2. 26: Librería de bloques de operadores discontinuos. ....	46
Figura 2. 27: Librería de bloques de operadores de fuentes. ....	46
Figura 2. 28: Librería de bloques de operadores discretos. ....	47
Figura 2. 29: Librería de bloques de operadores matemáticos. ....	47

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Representación básica de un controlador PID. ....	49
Figura 3. 2: Función de transferencia para controlador proporcional. ....	50
Figura 3. 3: Valores asignados para un controlador proporcional. ....	50
Figura 3. 4: Respuesta del control proporcional con retroalimentación. ....	51
Figura 3. 5: Respuesta final del controlador proporcional. ....	52
Figura 3. 6: Valores asignados para un controlador PID. ....	52
Figura 3. 7: Respuesta final del controlador PID. ....	53
Figura 3. 8: Diagrama de bloques del controlador PID en simulink. ....	54
Figura 3. 9: Parámetros de configuración del bloque constante. ....	54
Figura 3. 10: Parámetros de configuración del bloque suma. ....	55
Figura 3. 11: Parámetros de configuración del bloque controlador PID. ....	55
Figura 3. 12: Diferentes tipos de controladores PID, PI, PD, P e I. ....	56
Figura 3. 13: Parámetros de configuración del bloque función de retardo. ...	56

Figura 3. 14: Parámetros de configuración del bloque función de transferencia. ....	57
Figura 3. 15: Respuesta del controlador PID usando Simulink. ....	58
Figura 3. 16: Diagrama de bloques del controlador de velocidad de motor. ....	59
Figura 3. 17: Diagrama de bloques del controlador de velocidad de motor. ....	60
Figura 3. 18: Diagramas de bloques para modelado de un motor DC. ....	61
Figura 3. 19: Parámetros de configuración de fuente de voltaje DC. ....	62
Figura 3. 20: Parámetros de configuración del control de voltaje PWM. ....	63
Figura 3. 21: Parámetros de configuración del modo de simulación y supuestos de carga del puente H. ....	64
Figura 3. 22: Parámetros de configuración de umbral de entrada del puente H. ....	64
Figura 3. 23: Parámetros de configuración del puente. ....	65
Figura 3. 24: Parámetros de configuración del ángulo inicial del sensor de movimiento mecánico. ....	66
Figura 3. 25: Circuito equivalente para un motor DC. ....	67
Figura 3. 26: Parámetros de configuración del torque eléctrico del motor DC. ....	67
Figura 3. 27: Parámetros de configuración mecánica del motor DC. ....	68
Figura 3. 28: Modelado en simulink de un motor DC. ....	71
Figura 3. 29: Parámetros de configuración Solver para el modelado del motor DC. ....	72
Figura 3. 30: Gráfica de corriente del motor DC. ....	72
Figura 3. 31: Gráfica de velocidad del motor DC. ....	73

## Resumen

El presente trabajo de titulación consiste en realizar la implementación de métodos matemáticos mediante el modelamiento de escenarios de simulación de sistemas de control eléctrico utilizando la herramienta robusta MatLab/Simulink. Inicialmente se realiza una descripción general del trabajo donde se especifica los antecedentes del problema a investigar, definiendo las necesidades, planteando objetivos y la metodología de investigación que se utiliza en el trabajo de titulación. En el siguiente capítulo, se realiza la descripción teórica de los sistemas de control, así como los diferentes tipos de sistemas y de las diversas aplicaciones que se desarrollan en la ingeniería eléctrica y electrónica. También, se analiza brevemente el uso del software MatLab/Simulink y su utilidad en el desarrollo de sistemas controlados y retroalimentados. Finalmente, se desarrollaron tres escenarios de simulación de sistemas de control en MatLab y Simulink, lo que permitirá a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrico Mecánica el desarrollo de otras aplicaciones en el área de máquinas eléctricas y distribución eléctrica.

**Palabras clave:** SISTEMAS, CONTROLADORES, BUCLES, RETROALIMENTADO, MOTORES, PID

## CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación

### 1.1. Introducción.

La teoría del control es un campo relativamente nuevo en la ingeniería cuando se compara con los temas centrales, tales como la estática, la dinámica, la termodinámica, electricidad, en otros campos de la ingeniería. Los primeros ejemplos de sistemas de control se desarrollaron antes de que la ciencia fuera plenamente comprendida. La figura 1.1 muestra un ejemplo de un controlador, donde las esferas están montadas en un eje que gira y es impulsado por el motor a través de la polea mostrada.

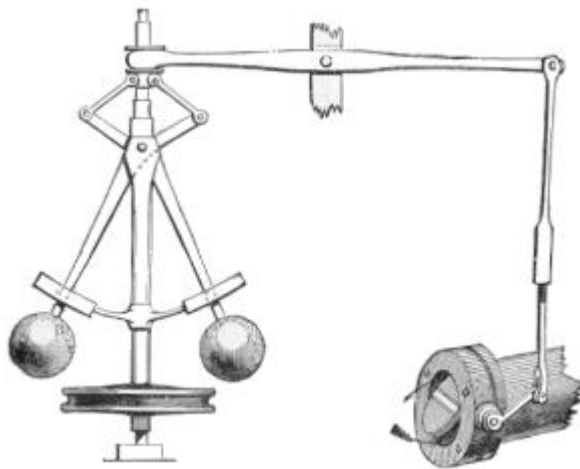


Figura 1. 1: Sistema gobernador de esferas.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

A medida que el motor se acelera, las bolas volantes son lanzadas hacia fuera por su fuerza centrífuga. Este movimiento hacia fuera tira del brazo de la palanca hacia abajo, lo que eleva su otro extremo. Esto se une a la válvula de entrada de vapor, que se cierra a medida que los pesos de la esfera se mueven hacia fuera. Así que, si el motor continúa girando, la

válvula de vapor de entrada se cerrará, apagando el fluido que conduce el motor.

Hoy en día, las industrias son cada vez más exigentes para la automatización de procesos en todos los sectores como la defensa, las industrias, la robótica, etc. Los motores de corriente continua (CC o también conocida como DC en inglés *Direct Current*) se han utilizado en los variadores de velocidad. Por ejemplo, las características de control versátiles de los motores de corriente continua han contribuido a su uso extensivo en la industria.

Las unidades de CC son menos complejas con una sola conversión de energía de AC a DC. Los convertidores de frecuencia son normalmente menos caros para la mayoría de las clasificaciones de potencia (caballos de fuerza). Los motores de corriente continua tienen una larga tradición de uso como máquinas de velocidad ajustable y una amplia gama de opciones han evolucionado para este propósito.

## **1.2. Antecedentes del problema a investigar.**

Diferentes trabajos fueron encontrados durante la búsqueda de información, en la que utilizan modelos matemáticos a través de diferentes plataformas de simulación, o a su vez integran dos plataformas para simular un sistema de control. La búsqueda fue realizada básicamente en el repositorio de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo (FETD). Por ejemplo



(Rivera V., 2017) realizó el diseño e implementación de un control PID en un sistema SCADA a través de las plataformas MatLab/Simulink y LabView. El trabajo consistía en modelar en tiempo real el control de un motor DC utilizando MatLab/Simulink, LabView y el entrenador de planta de control de National Instruments.

Otro trabajo similar que fue desarrollado por (Benálcazar T. & Verduga F., 2013), en el cual realizaron el diseño e implementación de un sistema de control PID de posición de un motor de corriente continua por medio de hardware y software Matlab/Simulink para uso didáctico en la FETD.

### **1.3. Definición del problema a investigar.**

Escasa información de modelamiento de sistemas de control en el repositorio de la carrera Ingeniería Eléctrico Mecánica. Por lo cual surge la necesidad de implementar métodos matemáticos para modelar sistemas de controles eléctricos utilizando la herramienta de simulación MatLab/Simulink.

### **1.4. Justificación del problema a investigar.**

Utilizamos modelos matemáticos cuantitativos de sistemas físicos para diseñar y analizar sistemas de control. El comportamiento dinámico es generalmente descrito por ecuaciones diferenciales ordinarias. Existen una amplia gama de proyectos que tratan estos sistemas, incluyendo mecánicos, hidráulicos y eléctricos. Dado que la mayoría de los sistemas físicos son no

lineales, tal es el caso de las aproximaciones de linealización, las que nos permiten utilizar los métodos de la transformada de Laplace.

En los sistemas de control, se procede con la obtención de las relaciones de entrada-salida para componentes y subsistemas en forma de funciones de transferencia. Los bloques de función de transferencia pueden organizarse en diagramas de bloques o gráficos de flujo de señal para representar gráficamente las interconexiones. Los diagramas de bloques (y los gráficos de flujo de señal) son herramientas muy convenientes y naturales para diseñar y analizar sistemas de control complicados.

## **1.5. Objetivos del problema a investigar.**

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

Diseñar los escenarios de simulación mediante métodos matemáticos para la ingeniería en sistemas de control eléctrico usando MatLab/Simulink.

### **1.5.2. Objetivos específicos:**

- Describir los fundamentos teóricos de los sistemas de control orientados a la simulación de aplicaciones físicas, electricidad y electrónica.
- Diseñar los modelos de simulación de sistemas de controles utilizando la plataforma MatLab/Simulink.
- Evaluar los resultados obtenidos de los modelos de simulación diseñados en MatLab/Simulink.

## **1.6. Hipótesis.**

A través de la implementación de métodos matemáticos se demostrará como modelar sistemas de controles para aplicaciones en la carrera de Ingeniería Eléctrico-Mecánica utilizando la plataforma MatLab/Simulink.

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

El tipo de metodología a utilizar es experimental a partir de observaciones y modelos. Un modelo puede usado para ayudar a los estudiantes a entender cómo funciona un proceso, o para explicar ideas o un concepto. Más de un modelo puede ser utilizado para explicar diferentes aspectos del mismo concepto, por ejemplo, hay varios modelos que ayudan a describir la estructura del átomo.

Algunos modelos ya se han producido, por ejemplo, un modelo de corazón. Otros necesitarán ser instalados, por ejemplo, usando harina para modelar cráteres de impacto en la Luna. Los modelos electrónicos pueden mostrar secuencias y procesos, y algunos se pueden encontrar en Internet.

## **CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica.**

En el presente capítulo se describen los fundamentos de sistemas de controles eléctricos, así como la plataforma de simulación MatLab/Simulink que justifiquen el desarrollo del trabajo de titulación denominado “Implementación de métodos matemáticos para la ingeniería en sistemas de control eléctrico usando MatLab/Simulink”.

### **2.1. ¿Qué es un Sistema?**

Un sistema se entiende como la colección de componentes que interactúan entre sí y con su entorno. Algunos ejemplos de sistemas, los seres humanos, los dispositivos mecánicos, interruptores eléctricos, plantas eléctricas, los animales, la atmósfera, el mercado de valores, el sistema político, etc. Otro ejemplo, en el campo de la ingeniería aeroespacial se consideran algunos sistemas aeroespaciales como aviones, helicópteros, misiles, aviónica, motores de cohetes, y así sucesivamente.

### **2.2. ¿Qué es un Sistema de Control?**

Un sistema de control es una colección de componentes diseñados para impulsar un sistema dado (planta) con una entrada dada a una salida deseada. En las figuras 2.1 a 2.4 se muestran varios diagramas de bloques de diferentes aplicaciones de sistemas cuyos procesos son: entrada, control, planta o sistema y salida.

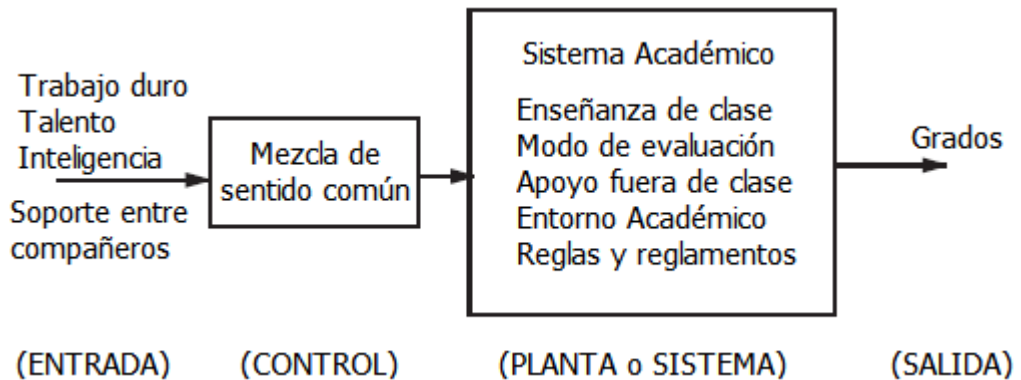


Figura 2. 1: Diagrama de bloques de un sistema académico.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

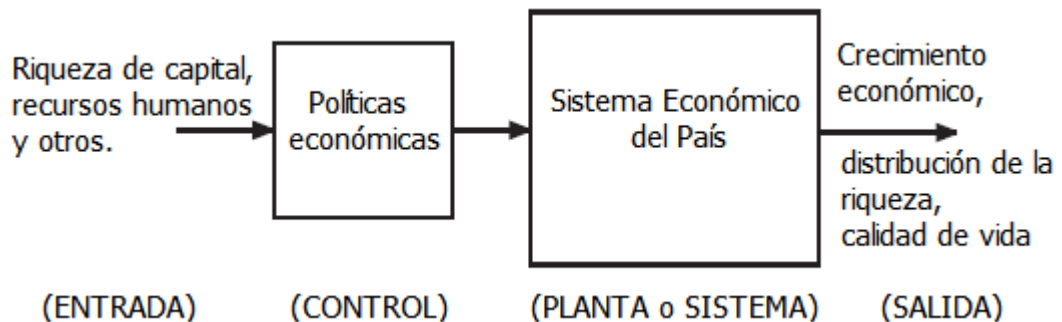


Figura 2. 2: Diagrama de bloques del sistema económico de un país.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

La figura 2.1 muestra un simple diagrama de bloques del proceso de un sistema académico. La figura 2.2 muestra el proceso para un sistema económico de un país. Estos dos diagramas de bloques guardan relación a un sistema y sirve de ejemplo como son los procesos en los mismos.

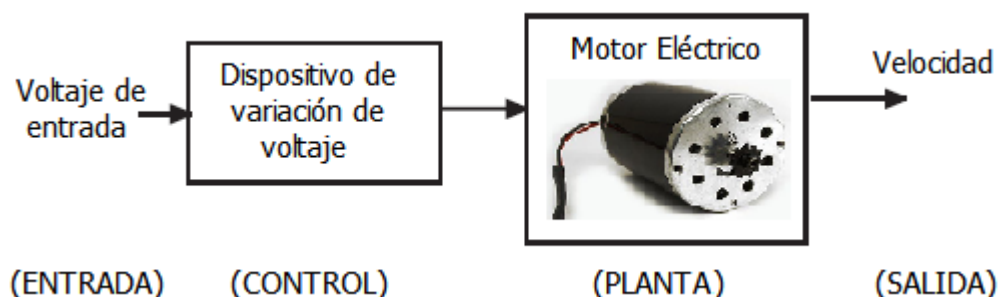


Figura 2. 3: Diagrama de bloques del control de velocidad de motor eléctrico.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

En la figura 2.3 se muestra el proceso de un sistema de control de la velocidad de motores eléctricos. En la entrada se tiene la alimentación de voltaje, el dispositivo de variación de voltaje se comporta como la parte de control, mientras que el motor eléctrico sería la planta, y finalmente se tiene en la salida la velocidad del motor.

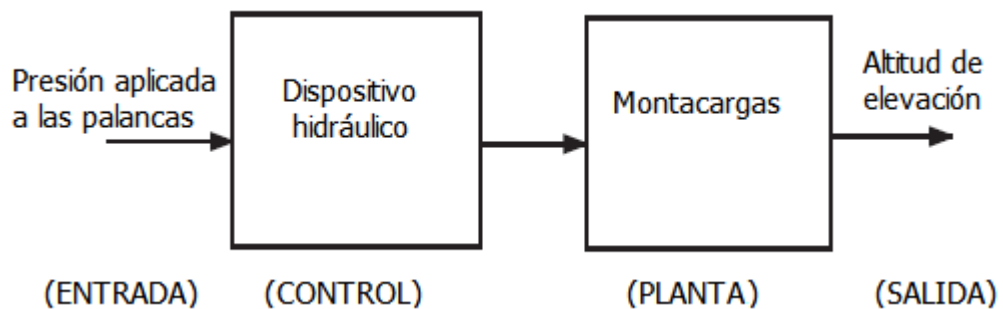


Figura 2. 4: Diagrama de bloques del control de un montacargas o grúa hidráulica.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

En la figura 2.4 se muestra el sistema de control de grúas hidráulicas. La presión aplicada en la palanca es el proceso de entrada, el control sería el dispositivo hidráulico, la grúa se comporta como la planta, y finalmente en la salida se obtiene la altitud de elevación de la grúa hidráulica.

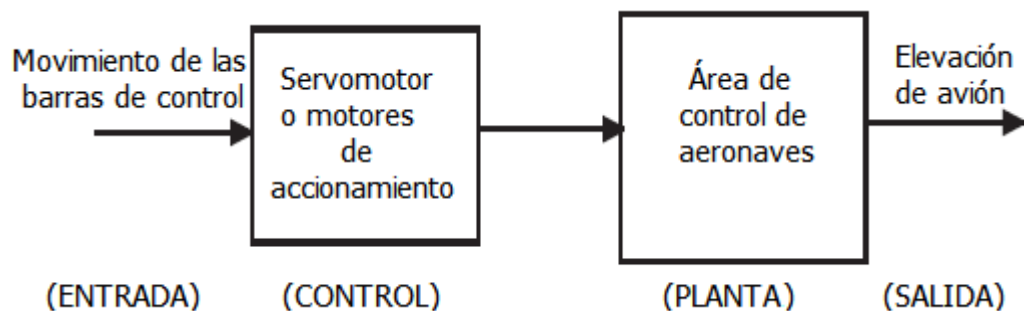


Figura 2. 5: Diagrama de bloques del control para elevación de aeronaves.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

En la figura 2.5 se muestra el control para despegue o elevación de aviones. El proceso se mantiene siempre igual, es decir, entrada, control, planta y salida.

### **2.3. Descripción general de sistemas de control en ingeniería.**

La ingeniería se ocupa de comprender y controlar los materiales y fuerzas de la naturaleza para el beneficio de la humanidad. La ingeniería de sistemas de control se ocupa de comprender y controlar segmentos de su entorno, a menudo llamados sistemas, para proporcionar productos económicos útiles para la sociedad. El doble objetivo de comprensión y de control son complementarios, porque el control eficaz de los sistemas requiere que los sistemas sean comprendidos y modelados.

Además, la ingeniería de control debe considerar a menudo el control de sistemas poco conocidos, como, por ejemplo, los sistemas de procesos químicos. El reto actual de la ingeniería de control es el modelado y control de sistemas modernos, complejos e interrelacionados tales como sistemas de control de tráfico, procesos químicos, sistemas eléctricos, sistemas robóticos, entre otras aplicaciones. Simultáneamente, un futuro ingeniero tiene la oportunidad de controlar muchos sistemas de controles eléctricos, de automatización industrial muy útiles e interesantes. Quizás la cualidad más característica de la ingeniería de control es controlar máquinas y procesos industriales, y que sean económicos en beneficio de la sociedad.

### **2.4. Clasificación de los sistemas de control**

Las clasificaciones de los sistemas de control son muy amplias y la forma en que se clasifican depende principalmente de ciertos factores como los siguientes:

1. El método de análisis y diseño, como sistemas lineales y no lineales.
2. El tipo de la señal, como variable en el tiempo, invariable en el tiempo, datos continuos, sistemas discretos, etc.
3. El tipo de componente del sistema, como sistemas electro mecánico, hidráulico, térmico y neumático, etc.

Sin embargo, de una manera más sencilla, la mayoría de los ingenieros tienden a agrupar la mencionada clasificación del sistema de control en sistemas de control de bucle cerrado y abierto que se describen más adelante. A continuación, se presentan breves explicaciones de algunos de los tipos más comunes de uso de sistemas de control en la actualidad.

#### **2.4.1. Sistemas de control lineal y no lineal**

##### **a. Sistema de control lineales.**

Se dice que un sistema de control es lineal si obedece al principio de superposición y homogeneidad. En el caso de los principios de superposición, se puede lograr la respuesta a varias entradas se considera como una entrada a la vez y los resultados individuales se agregan o suman algebraicamente. Matemáticamente el principio de superposición del sistema de control lineal puede expresarse como:

$$F(x + y) = f(x) + f(y)$$

Donde  $x$  e  $y$  son dominios de la función  $F$ .



La propiedad homogénea del sistema lineal indica que, para cualquier  $x$  que pertenece a la función de dominio de  $F$  se expresa como:

$$F(\alpha x) = \alpha f(x)$$

En la figura 2.5 se observa una red resistiva que describe un sistema lineal, mientras que en la figura 2.6 se muestra la relación lineal existente entre la entrada y la salida.

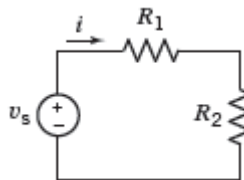


Figura 2. 6: Circuitos eléctrico básico que representa a un sistema lineal.  
Fuente: (Svoboda & Dorf, 2014)

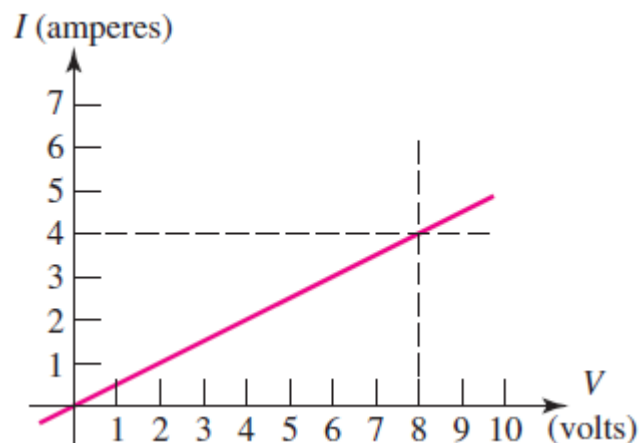


Figura 2. 7: Respuesta del sistema lineal para una red resistiva.  
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2012)

### b. Sistema de control no lineales.

Los sistemas no lineales no son proporcionales y los pequeños cambios no causan una respuesta pequeña. Los sistemas no lineales no obedecen los principios de superposición y las ecuaciones que describen los

sistemas son de naturaleza no lineal. La función  $f(x) = x^2$  es no lineal, porque:

$$f(x_1 + x_2) = (x_1 + x_2)^2 \neq (x_1)^2 + (x_2)^2$$

En consecuencia,

$$f(\alpha x) = (\alpha x)^2 \neq \alpha x^2$$

En general, los sistemas no lineales no son proporcionales y un pequeño cambio no afecta a la respuesta, por lo que el sistema es impredecible pero completamente determinista. Las figuras 2.8 y 2.9 muestran la ecuación voltaje-corriente de un diodo exponencial y no lineal, por lo que el sistema es un ejemplo de sistema no lineal.

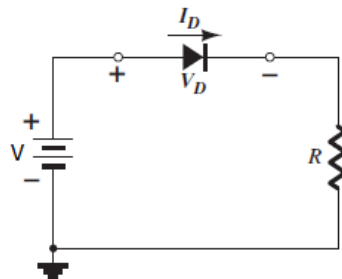


Figura 2. 8: Circuitos electrónico unipolar que representa a un sistema no lineal.  
Fuente: (Boylestad, Nashelsky, Navarro Salas, & Rodríguez Ramírez, 2009)

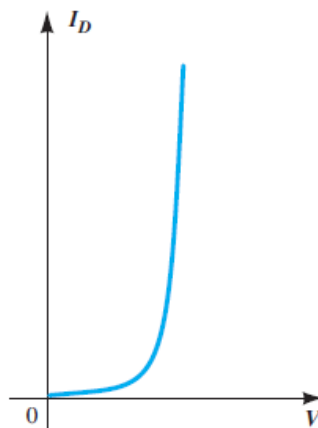


Figura 2. 9: Respuesta a un sistema no lineal.  
Fuente: (Boylestad et al., 2009)

Basándose en la figura 2.8 se puede comprender que cuando  $V$  (voltaje de entrada) aumenta hasta un cierto valor, la corriente permanece casi cero. Esto significa que la corriente de voltaje está relacionada exponencialmente entre sí, lo que indica que es una función no lineal.

#### 2.4.2. Sistemas variantes e invariantes en el tiempo.

Se dice que un sistema varía en el tiempo si los parámetros de los sistemas son afectados por el tiempo. En este caso, el sistema no depende de si la entrada y la salida funcionan con el tiempo. Por ejemplo, la masa de un vehículo espacial puede disminuir con el tiempo a medida que sale de la tierra. Sin embargo, si los parámetros no se ven afectados por el tiempo entonces se dice que el sistema es invariable en el tiempo, es decir, los parámetros del sistema son independientes del tiempo. Las figuras 2.10 y 2.11 ilustran una distinción entre el tiempo que varía y el sistema invariante.

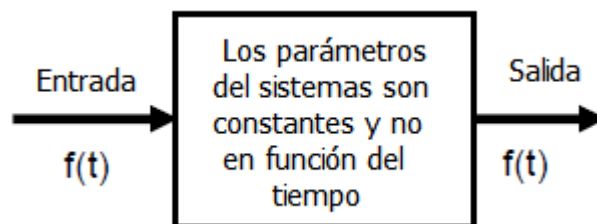


Figura 2. 10: Sistema invariante en el tiempo.

Fuente: (Bosch Roig, Gosálbez Castillo, Miralles Ricós, & Vergara Domínguez, 2015)

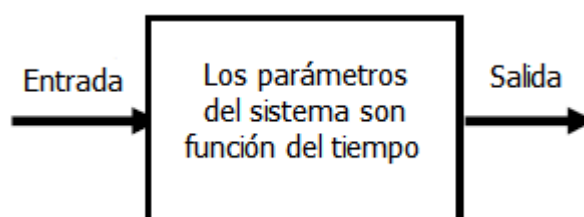


Figura 2. 11: Sistema variante en el tiempo.

Fuente: (Bosch Roig et al., 2015)

### 2.4.3. Sistema de control de tiempo continuo y discreto.

Para (Adams, 2013) una señal también se puede clasificar en función de si es una variable continua o discreta. También sostiene que una señal que es una función de variable continua (por ejemplo, una variable real) es un tiempo continuo. De forma similar, indica que una señal que es una función de variable discreta (por ejemplo, una variable entera) es un tiempo discreto.

En los sistemas de control de tiempo continuo todas las variables del sistema son las funciones de un tiempo continuo ( $t$ ). Un ejemplo es el control de velocidad de un motor de corriente continua (CC) usando retroalimentación de generador. Sin embargo, las variables de control del sistema de tiempo discreto pueden ser conocidas a ciertos intervalos. Por ejemplo, la computadora y el micro proceso dependen de señales discretas.

Los sistemas de tiempo continuo usan señales que son continuas con el tiempo, tal como se muestra en la figura 2.12. Mientras que los sistemas de tiempo discretos usan señales que no son continuas, tal como se observa en la figura 2.13.

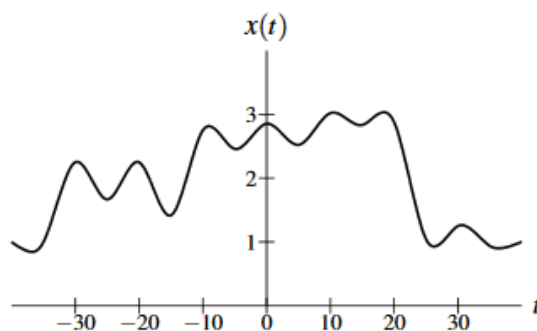


Figura 2. 12: Representación gráfica de señales de tiempo continuo.

Fuente: (Adams, 2013)

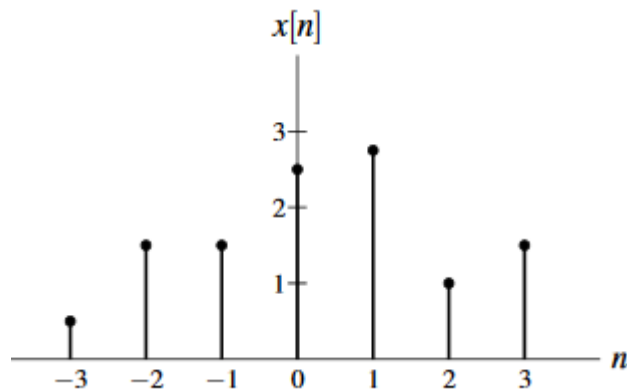


Figura 2. 13: Representación gráfica de señales de tiempo discreto.

Fuente: (Adams, 2013)

#### 2.4.4. Sistema de bucle o lazo abierto.

Como se dijo anteriormente, algunos ingenieros tienden a clasificar los sistemas de control en un sistema de bucle abierto y cerrado. Un sistema de bucle abierto, es aquel en el que la entrada de control al sistema no se ve afectada en modo alguno por la salida del sistema. Es decir, la entrada del sistema es totalmente independiente de la salida del sistema. Este tipo de sistema es simple de implementar, de bajo costo y fácil de mantener.

Un buen ejemplo de un sistema de bucle abierto es una tostadora automática en la que el control es proporcionado por un temporizador que indica la duración total en la que el pan se tostará. Aquí, la salida del sistema de tostado es el pan que está siendo pardusco. En este caso, el temporizador de tostadora se establece y el usuario sólo esperará el pan y lo examinará.

Otra aplicación real de los sistemas de control en circuito abierto es el sistema de calentamiento de agua, tal como se muestra en la figura 2.14.

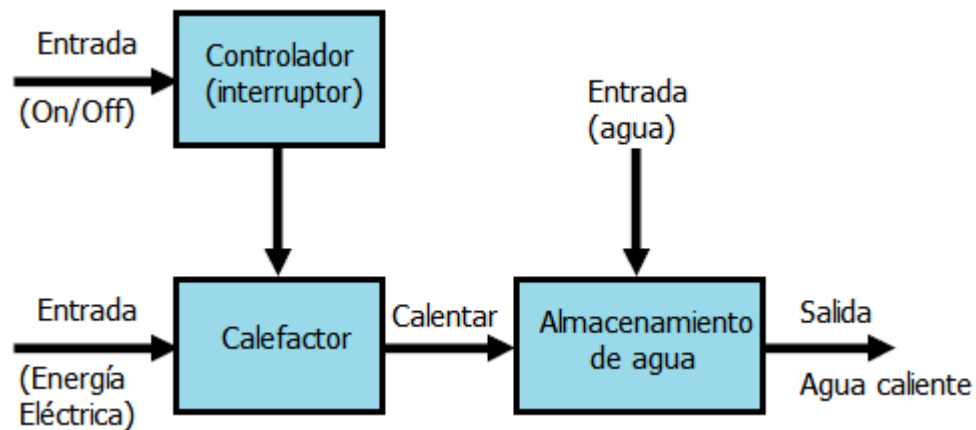


Figura 2. 14: Diagrama de bloques del dispositivo de calentamiento de agua.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

Como se puede ver en el diagrama, el controlador está trabajando como interruptor de encendido/apagado (On/Off) que regula la cantidad de calor. El calentador transfiere el calor al agua en el almacenamiento de agua, por lo que la entrada (energía eléctrica) no tiene ningún efecto en la salida del sistema. Sin embargo, el sistema de bucle abierto tiene algunos inconvenientes, tales como que el sistema es impreciso y poco fiable porque la precisión del sistema depende totalmente de la precalibración exacta del controlador. El sistema también da resultados inexactos cuando hay variación, es decir, el sistema no puede detectar cambios ambientales; y también el sistema no puede detectar las perturbaciones internas en los sistemas después de la etapa del controlador.

#### **2.4.5. Sistema de bucle o lazo cerrado.**

Para superar todas las desventajas del sistema de control de bucle abierto, se puede seleccionar los sistemas de bucle cerrado. En sistemas de bucle cerrado, la entrada real se ve afectada por la salida del sistema. Este sistema utiliza la realimentación de la salida para comparar con la entrada de referencia para generar la señal de error para que se tome una acción de control deseable. La entrada de referencia es directamente proporcional al valor deseado de la salida del sistema y si el valor es proporcional al tiempo se denomina entrada de consigna. Además, el sistema de control de bucle cerrado puede denominarse sistema de retroalimentación negativa. Esto se debe a que siempre se resta la salida del sistema de la entrada de referencia. Así, señal de error = salida del sistema de entrada de referencia.

A continuación, se describe brevemente la importancia de operatividad de un sistema de bucle cerrado.

- a. Para calcular el valor de la salida.
- b. Para medir el valor con el valor deseado y generar una señal de error.
- c. Un controlador que cambia la salida de un proceso de una manera depende de la señal de error.

El controlador por esa razón debe ser capaz de controlar suficiente potencia para producir la salida deseada.

### **Ventajas del sistema de lazo cerrado.**

Los sistemas de bucle cerrado tienen enormes ventajas sobre el bucle abierto, tales como:

1. Respuesta más rápida a una señal de entrada.
2. Control más preciso de la planta bajo perturbaciones y variación interna.
3. Menos sensible a los cambios en los errores de calibración (es decir, la recalibración no es necesaria).
4. La salida se compara con la entrada de referencia y la diferencia se utiliza como medio de control.
5. Se utiliza para que los sistemas de bucle abierto inestables sean estables mediante un mecanismo de retroalimentación.

Aparte de estas ventajas del sistema de circuito cerrado, el sistema tiene sus propias desventajas, ya que siempre requiere el uso de un sensor, elemento de comparación y unidad de corrección y que hace que el sistema sea más caro en comparación con el sistema de bucle abierto. El sistema es más complejo en diseño y difícil de implementar, también tiende a ser más inestable a medida que el controlador gana aumentos más allá de cierto



límite. El sistema de bucle cerrado puede ser ampliamente ilustrado por un modelo de diagrama de bloques que se muestra en la figura 2.15.

La figura 2.15 muestra el ejemplo real de un sistema de bucle cerrado que podría usarse para controlar la temperatura ambiente. Los elementos básicos incluyen un elemento de comparación (*Comparison Element, CE*), una unidad de control, un elemento de proceso o un objeto a controlar y un sensor. En este caso, la temperatura ambiente real o la señal de salida del sistema  $Y(t)$  es la retroalimentación al sensor donde el elemento de comparación comparado con la señal de entrada de referencia  $X(t)$  o la temperatura deseada de la habitación y la temperatura de la habitación es medido y controlado de acuerdo con la señal de error  $Z(t)$  generada. Por lo tanto,  $Z(t) = X(t) - Y(t)$

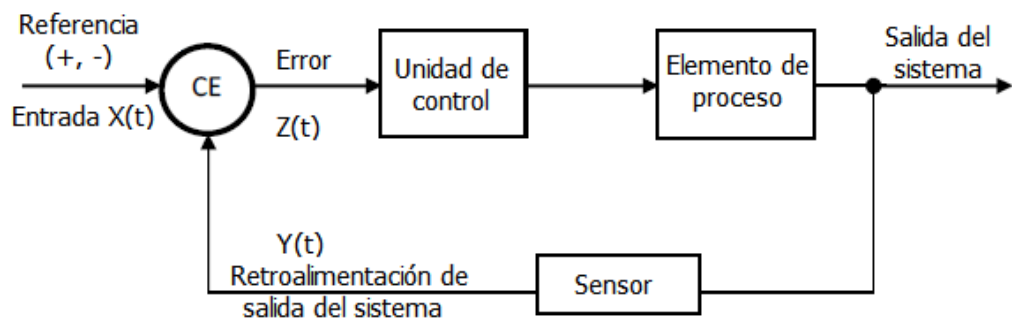


Figura 2. 15: Diagrama de bloques de un sistema de control de bucle cerrado.  
Fuente: (Dorf & Bishop, 2010)

En la tabla 2.1 se muestra una comparativa entre los sistemas de control de lazo abierto y cerrado.

Tabla 2. 1: Comparativa entre los sistemas de control de lazo abierto y cerrado.

<b>Lazo Abierto</b>	<b>Lazo Cerrado</b>
Cualquier cambio en la salida no tiene efecto sobre la entrada (no existe retroalimentación)	Cambios en la salida, afecta a la entrada que es posible mediante el uso de retroalimentación
La medición de la salida no es necesaria para el funcionamiento	La medición de la salida es necesaria
El elemento de realimentación está ausente	El elemento de retroalimentación está presente
El detector de errores está ausente	El detector de errores es necesario
Es inexacto y poco fiable	Altamente preciso y confiable
Muy sensible a las perturbaciones	Menos sensible a perturbaciones
Muy sensible a los cambios ambientales	Menos sensible a los cambios ambientales
El ancho de banda es pequeño	El ancho de banda es grande
Sencillo de construir y barato	Complicado al diseño y por lo tanto costoso
Generalmente estable	La estabilidad es la consideración principal al diseñar
Muy afectado por las no linealidades	Efecto reducido de no linealidades

Fuente: (Kamen & Heck, 2010)

## 2.5. Aplicaciones del uso de sistemas de control retroalimentados.

En esta sección se toman varias aplicaciones dadas en el texto de (Adams, 2013) y (Dorf & Bishop, 2010). El control de la retroalimentación es un hecho fundamental de la industria y la sociedad modernas. Por ejemplo, conducir un automóvil es una tarea agradable cuando el auto responde rápidamente a los comandos del conductor. Muchos automóviles modernos tienen dirección y frenos asistidos, que utilizan amplificadores hidráulicos para la amplificación de la fuerza del volante y los frenos, respectivamente.

### 2.5.1. Aplicación de control de dirección asistida en automóviles.

En la figura 2.16 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control de dirección de un automóvil. El curso deseado se compara con una medición del curso real para generar una medida del error (véase la figura 2.17). Esta medida se obtiene mediante retroalimentación visual y táctil (movimiento del cuerpo). Hay una retroalimentación adicional de la sensación del volante por la mano (sensor). Este sistema de retroalimentación es una versión familiar del sistema de control de dirección en un transatlántico o los controles de vuelo en un avión grande.

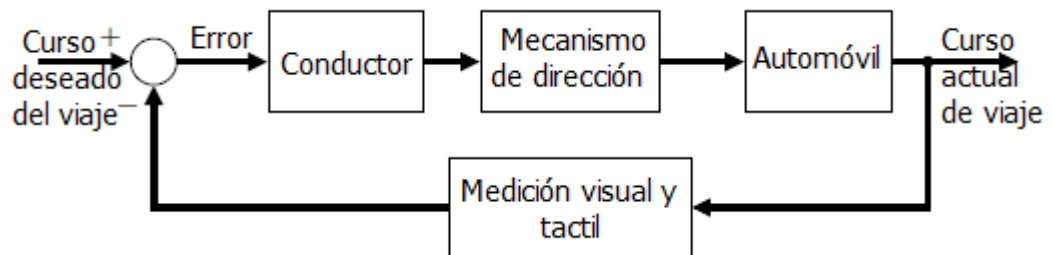


Figura 2. 16: Diagrama de bloques del sistema de control de dirección de automóviles.

Fuente: (Adams, 2013; Dorf & Bishop, 2010)

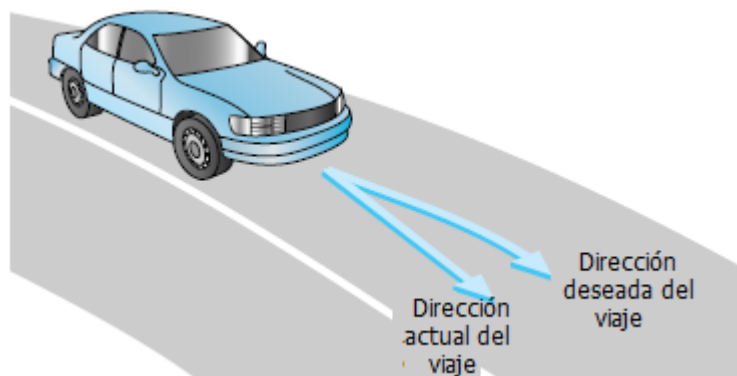


Figura 2. 17: Comportamiento real de la dirección de desplazamiento deseada.

Fuente: (Adams, 2013; Dorf & Bishop, 2010)

### 2.5.2. Aplicación de un sistema de control de realimentación negativa.

Los sistemas de control funcionan en una secuencia de bucle cerrado, tal como se muestra en la figura 2.18. Con un sensor preciso, la salida medida es igual a la salida real del sistema. La diferencia entre la salida deseada y la salida real es igual al error, que desde luego es ajustado por el dispositivo de control (tal como un amplificador).

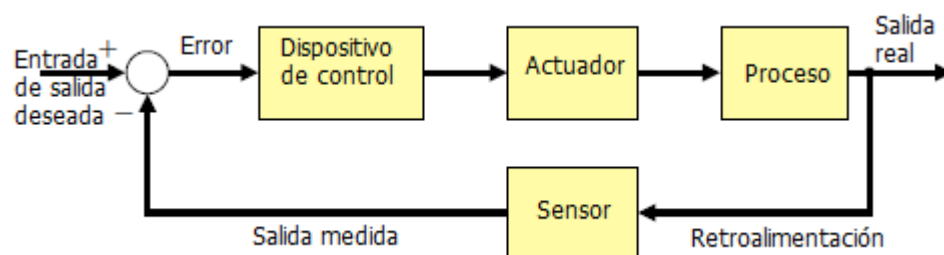


Figura 2. 18: Diagrama de bloques del sistema de retroalimentación que representa un sistema básico de control de bucle cerrado.

Fuente: (Adams, 2013; Dorf & Bishop, 2010)

La salida del dispositivo de control hace que el actuador module el proceso para reducir el error. La secuencia es tal, por ejemplo, que, si un barco se dirige incorrectamente a la derecha, el timón se acciona para dirigir el barco a la izquierda. El sistema mostrado en la figura 2.18 es un sistema de control de realimentación negativa, porque la salida se resta de la entrada y la diferencia se utiliza como señal de entrada al amplificador de potencia.

### 2.5.3. Aplicación de sistemas de control en la industria energética.

Es interesante observar que, en la industria de energía eléctrica, la industria más grande a nivel mundial, la brecha es relativamente insignificante. La industria de energía eléctrica está principalmente

interesada en la conversión, control y distribución de energía. Es fundamental que el control por computadora se aplique cada vez más a la industria energética para mejorar el uso eficiente de los recursos energéticos.

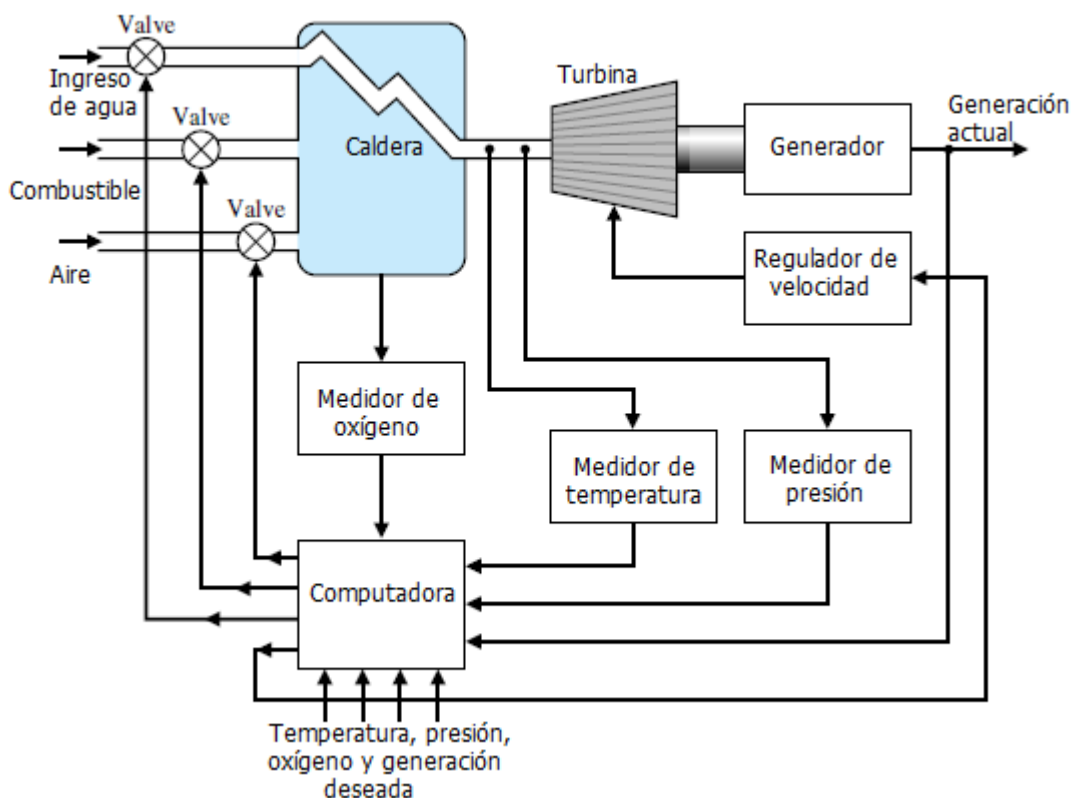


Figura 2. 19: Diagrama de bloques del sistema de.  
Fuente: (Adams, 2013; Dorf & Bishop, 2010)

Además, el control de las centrales eléctricas para la emisión mínima de residuos se ha vuelto cada vez más importante. Las plantas modernas de gran capacidad, que superan los varios cientos de megavatios, requieren sistemas de control automático que explican la interrelación de las variables de proceso y la producción óptima de energía. En la figura 2.19 se muestra el modelado simplificado que muestra varias de las variables de control importantes de un sistema de generación de grandes calderas.

## **2.6. Fundamentos de programación en MatLab.**

(Kiusalaas, 2005) indica que MatLab es un lenguaje de programación de alto nivel y la visualización de datos diseñada alrededor de un entorno de programación interactivo. Es decir, que MatLab es una robusta plataforma utilizada en instituciones de educación superior. Aunque, se sabe que el costo para adquirir la licencia profesional resulta ser alto. (Xue & Chen, 2014) los problemas de simulación de sistemas de control implican una gran cantidad de computación científica, y las computadoras tienen la capacidad de resolver algunos complicados y tediosos problemas matemáticos. Las capacidades de computación científica dependen de los algoritmos y su implementación.

### **2.6.1. Sentencias de control de flujo.**

En esta sección se enumeran las diferentes sentencias que son utilizadas a menudo en MatLab y que fueron extraídas brevemente del texto correspondiente a (Gil Rodríguez, 2015). A continuación, se describen cada una de las sentencias de control de flujo:

- a. Input:** esta sentencia permite el ingreso de variables ya sean literales o numéricas. A continuación, se muestra un ejemplo para cada caso.

```
Command Window
>> S=input('¿Cómo te llamas? ', 's');
¿Cómo te llamas? Alberto Arias
>> ['Hola ', S]

ans =

Hola Alberto Arias
```

```
Command Window
>> T=input('¿Cuál es el diámetro de la esfera? ');
¿Cuál es el diámetro de la esfera? 10
>> T/2

ans =

5
```

**b. if – else – end:** siendo uno de los saltos condicionales más elementales de programación. A continuación, los comandos **if** y **end** se ejecutan siempre que sea verdadero resulta un '1' y si es falsa resulta un '0'.

```
Command Window
>> if 'x'=='x', 'Trabajo de Titulación', end

ans =

Trabajo de Titulación

>> if 'x'=='y', 'Trabajo de Titulación', end
>> |
```

A continuación, se muestra la programación de un ejemplo donde se utiliza los comandos **if – else – end**, y más abajo se muestra el resultado en el Command Window de MatLab.

```

1      % ejemplo1.m para la sentencia if-else-end
2 -    M=input('Cantidad de botellas a vender ?');
3 -    if M<=5
4 -        Pu=7;
5 -        Pt=Pu*M;
6 -    elseif M<=12
7 -        Pu=5.5;
8 -        Pt=Pu*M;
9 -    else
10 -        Pu=5;
11 -        Pt=Pu*M;
12 -    end
13 -    Pu;
14 -    Pt;|

```

```

Command Window
>> ejemplo1
Cantidad de botellas a vender ?10
>> Pu
Pu =
    5.5000
>> Pt
Pt =
    55

```

- c. **while–end**: esta sentencia permite ejecutar los comandos del bucle, siempre que la condición es verdadera.
- d. **for–end**: esta sentencia permite realizar un conjunto de instrucciones iguales, en el que varían uno o más subíndices.
- e. **switch end**: esta sentencia permite ejecutar un grupo de sentencias basados en un valor variable o expresión.

## 2.6.2. Gráficos en MatLab.

Existen diferentes tipos de gráficos que se pueden generar en MatLab. A continuación, se enumeran los diferentes tipos de comandos que permite



graficar funciones: (a) **fplot**, (b) **plot**, (c) **plotyy**, (d) **plotmatrix**, (e) **bar**, (f) **bar**, (g) **stairs**, (h) **errorbar**, (i) **stem**, (j) **semilogy**, entre otros comandos. A continuación, se muestran varios ejemplos de gráficas desde Command Window de MatLab.

- a. Función **stem** para graficar datos discretos: Sea  $y = e^{-\alpha t} \cos \beta t$ , se procede a escribir en Command Window los datos en tiempo continuo y en la figura 2.20 se muestra la gráfica de la función dada.

```
>> alpha=.02;  
>> beta=.5;  
>> t=0:4:200;  
>> y=exp(-alpha*t).*cos(beta*t);  
>> plot(t,y)  
>> plot(t,y)
```

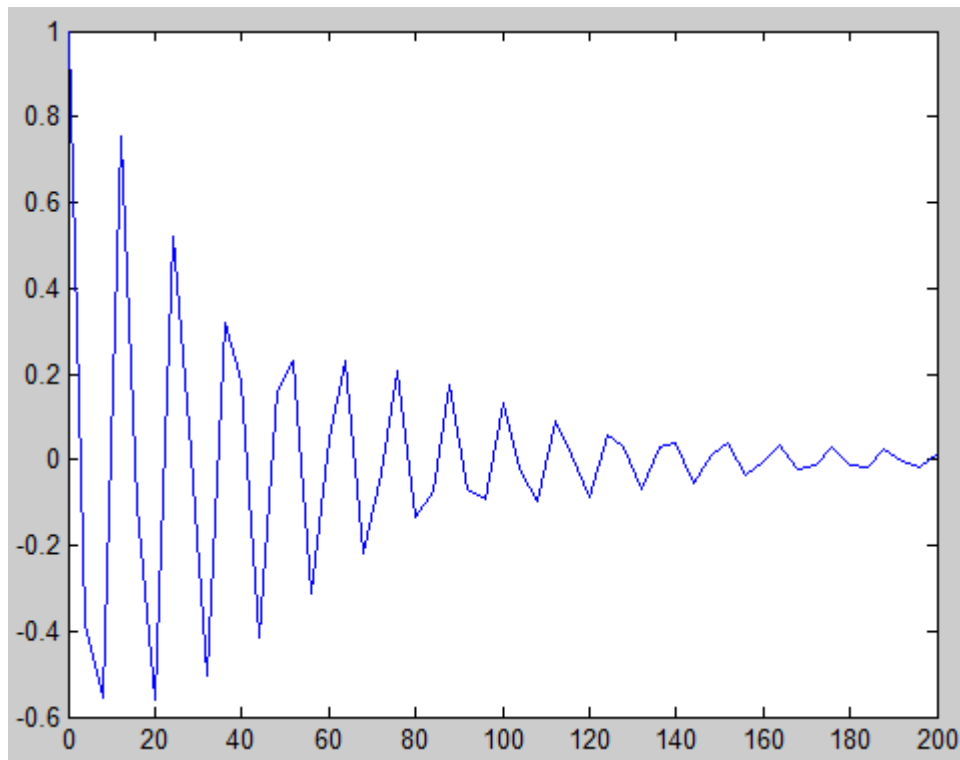


Figura 2. 20: Gráfica correspondiente de  $y = e^{-\alpha t} \cos \beta t$ .

Fuente: (MathWorks, 2013)

Elaborado por: Autor

Después se realiza el ploteo o gráfica de **stem** de la función anterior vista en la figura 2.20 en la cual sólo traza puntos discretos de la curva, tal como se muestra en la 2.21.

```
>> stem(t,y)
>> xlabel('Tiempo en \musecs')
>> ylabel('Magnitud')
```

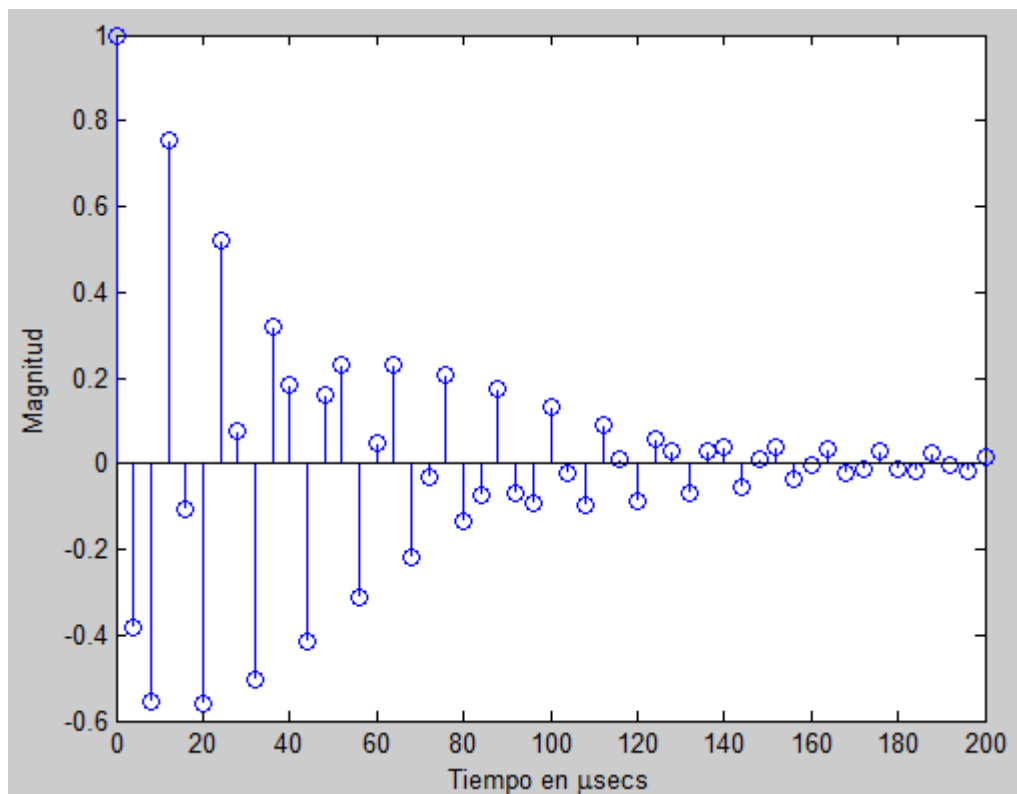


Figura 2. 21: Gráfica correspondiente de la función stem.

Fuente: (MathWorks, 2013)

Elaborado por: Autor

b. Función **stem\_handles** para datos combinados: crear gráficas discretas que muestre la combinación lineal de dos funciones:

```
>> x=linspace(0,2*pi,60);
>> a=sin(x);
>> b=cos(x);
>> stem_handles = stem(x,a+b);
>> hold on
>> plot_handles = plot(x,a,'--r',x,b,'--g');
```

```

>> hold off
>> legend_handles=[stem_handles(1);plot_handles];
>> legend(legend_handles, 'a+b', 'a=sin(x)', 'b=cos(x)')
>> xlabel('Tiempo en \musecs')
>> ylabel('Magnitud')
>> title('Combinación lineal de dos funciones')

```

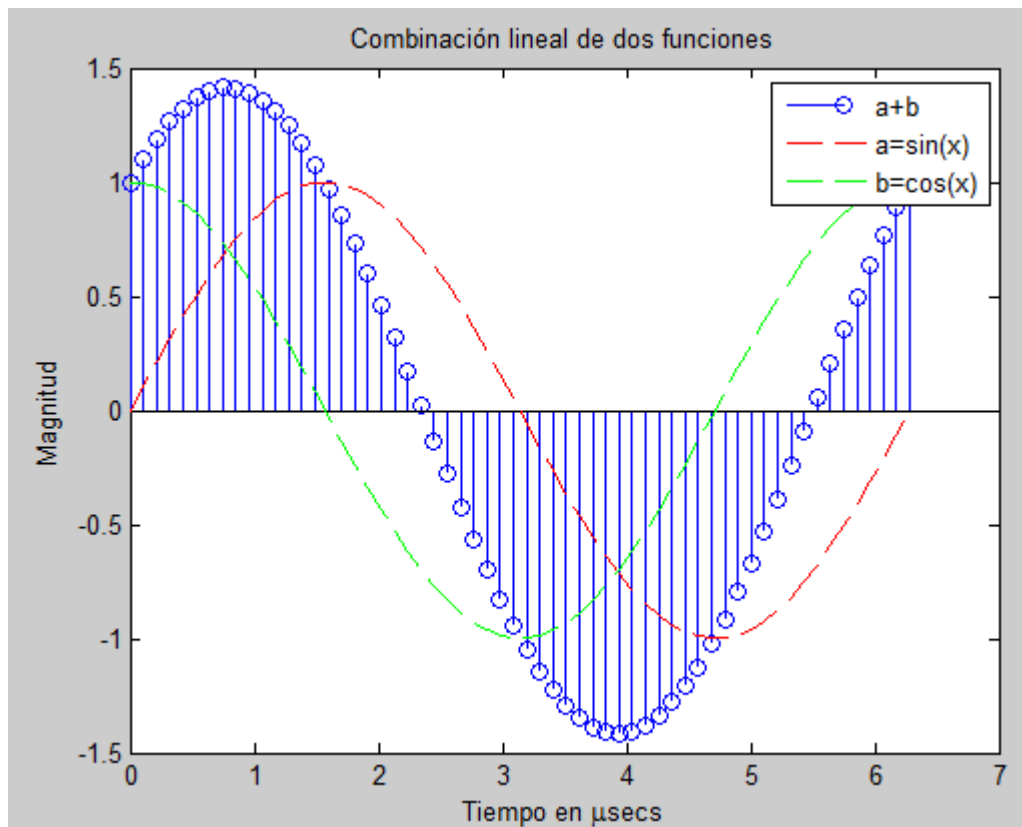


Figura 2. 22: Gráfica correspondiente a la combinación de dos funciones.

Fuente: (MathWorks, 2013)

Elaborado por: Autor

Otra funcionalidad es realizar gráficos 3D en MatLab, por ejemplo, en la figura 2.23 se muestra una gráfica 3D discreta en función del tiempo:

```

>> th=(0:127)/128*2*pi;
>> x=cos(th);
>> y=sin(th);
>> f=abs(fft(ones(10,1),128));
>> stem3(x,y,f,'d','fill')
>> view([-65 30])
>> xlabel('Real')
>> ylabel('Imaginaria')

```

```
>> zlabel('Amplitud')
>> title('Magnitud de la respuesta en frecuencia')
>> rotate3d on
```

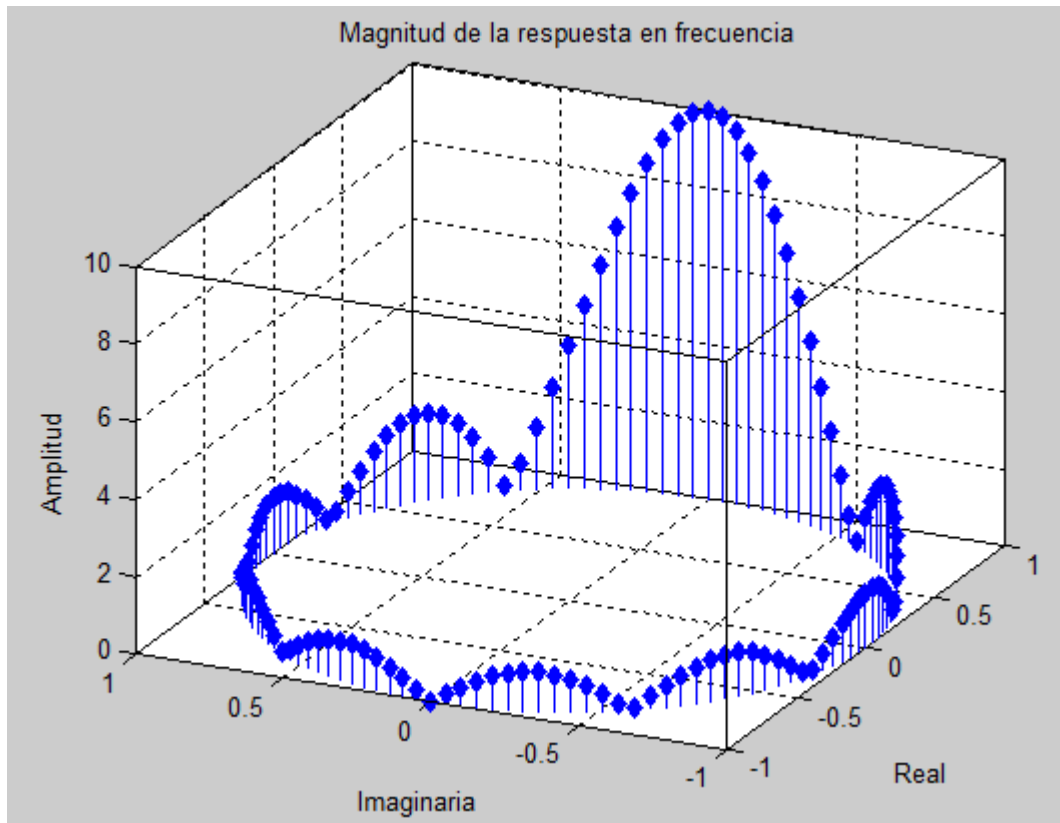


Figura 2. 23: Gráfica 3D discreta utilizando la función stem.

Fuente: (MathWorks, 2013)

Elaborado por: Autor

## 2.7. Modelado en la plataforma Simulink.

Simulink fue lanzado por primera vez por MathWorks Inc. en 1990. Proporciona un diagrama de bloques basado en modelado y entorno de simulación. El nombre anterior para Simulink era "Simulab". Sin embargo, ya que sonaba muy similar a otro famoso idioma, Simula, fue renombrado como Simulink el año siguiente. De su nuevo nombre, se puede ver dos significados: "simu" significa que es una herramienta de simulación, mientras

que "link" se refiere al hecho de que se puede usar para vincular bloques que forman un sistema a ser simulado. (Xue & Chen, 2014)

Para poder acceder a esta plataforma, se escribe el comando Simulink desde Command Window de Matlab, o hacer clic en el icono de la barra de herramientas, posterior a eso se mostrará la ventana de la biblioteca de librerías de Simulink, tal como se muestra en la figura 2.24.

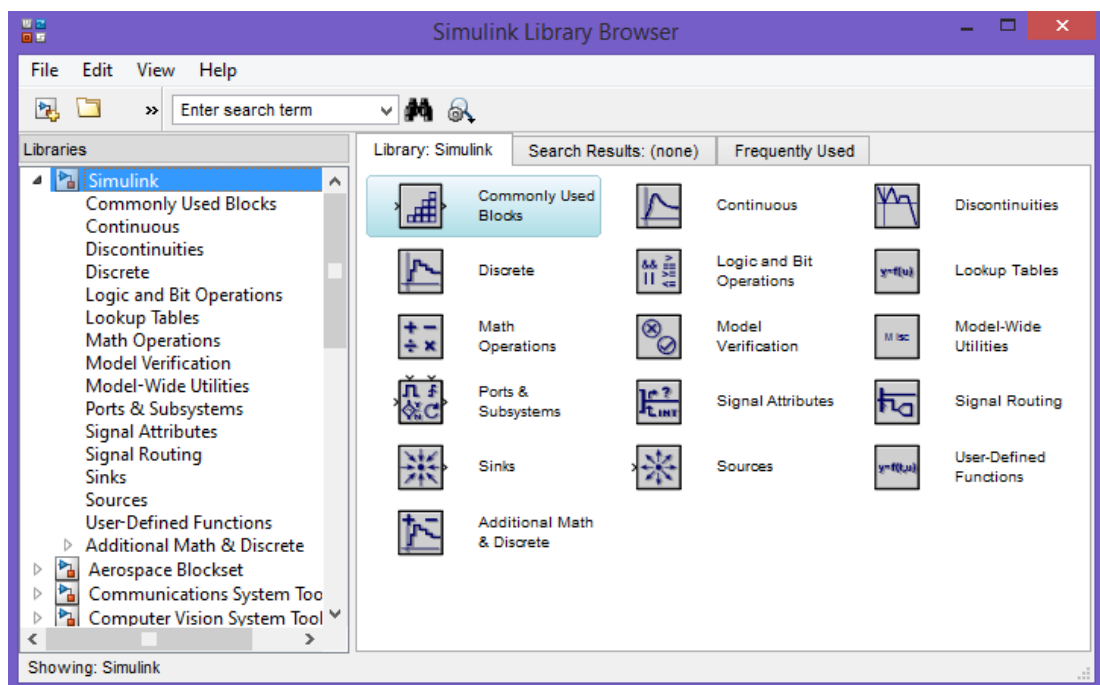


Figura 2. 24: Ventana principal de la librería de la plataforma Simulink.

Elaborado por: Autor

En las figuras 2.25 a 2.31 se muestran las librerías de los diferentes bloques que tiene Simulink, tales como: continuos, discontinuos, fuentes, discretos, matemáticos, lógicas y binarias, y salidas (Gil Rodríguez, 2015).

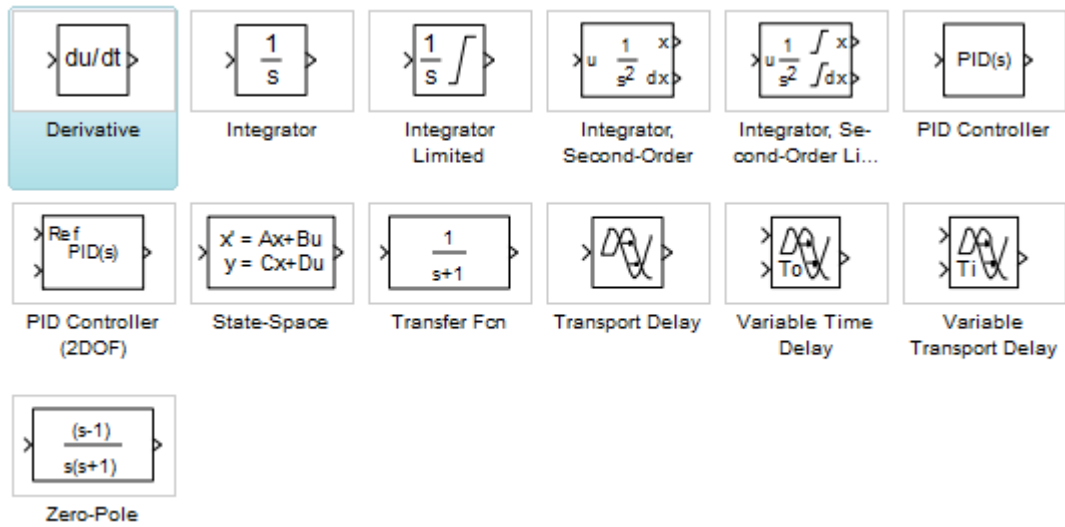


Figura 2. 25: Librería de bloques de operadores continuos (continuos).

Fuente: (Gil Rodríguez, 2015)

Elaborado por: Autor

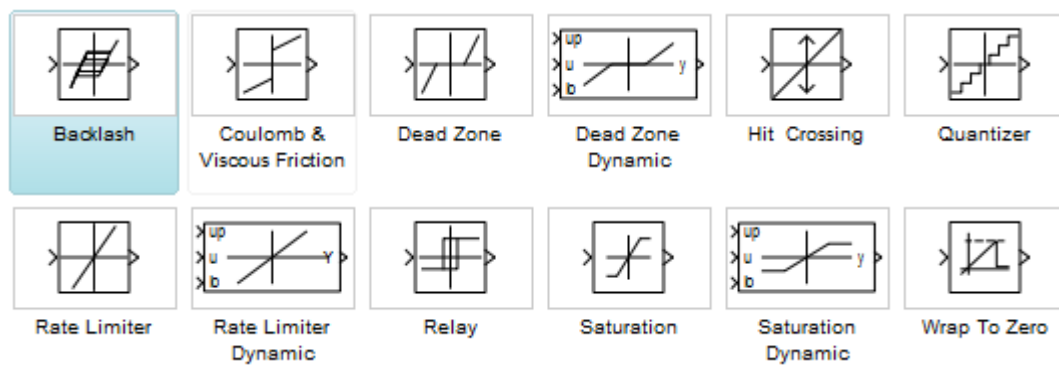


Figura 2. 26: Librería de bloques de operadores discontinuos.

Fuente: (Gil Rodríguez, 2015)

Elaborado por: Autor

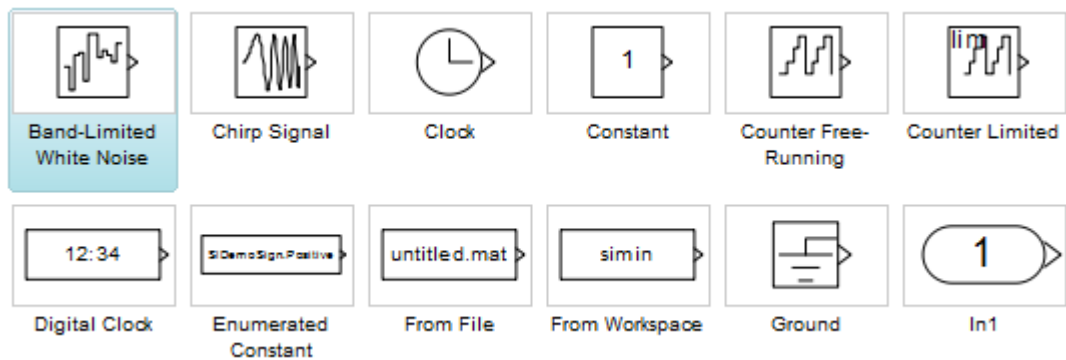


Figura 2. 27: Librería de bloques de operadores de fuentes.

Fuente: (Gil Rodríguez, 2015)

Elaborado por: Autor

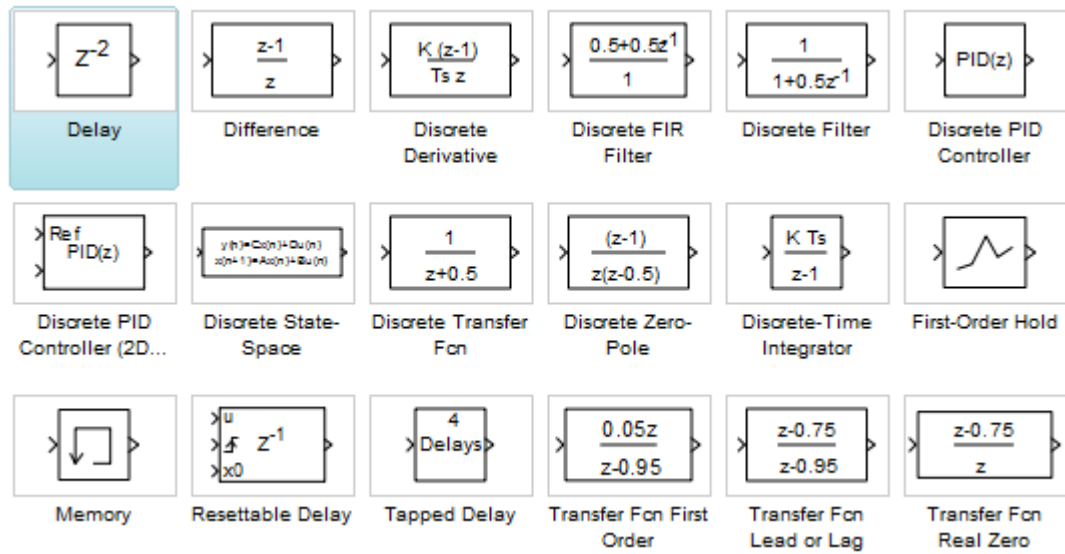


Figura 2. 28: Librería de bloques de operadores discretos.

Fuente: (Gil Rodríguez, 2015)

Elaborado por: Autor

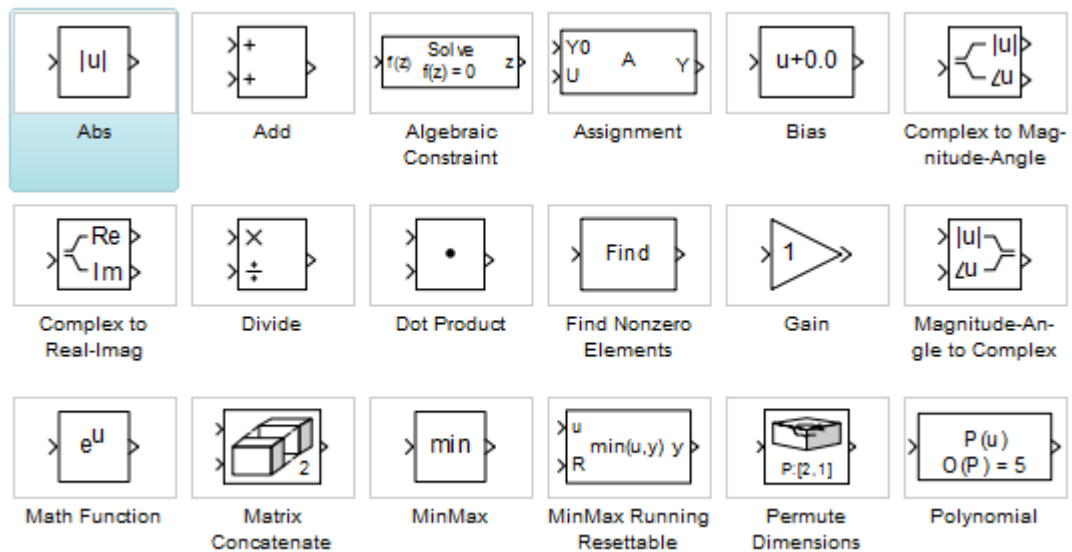


Figura 2. 29: Librería de bloques de operadores matemáticos.

Fuente: (Gil Rodríguez, 2015)

Elaborado por: Autor

## CAPÍTULO 3: Modelado en MatLab/Simulink.

### 3.1. Aplicación práctica del diseño de un controlador PID.

En esta sección se desarrolla una estructura de compensador de retroalimentación simple pero versátil. Para lo cual, se va utilizar el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). A continuación, se describe el efecto de cada uno de los parámetros PID en la dinámica de bucle cerrado y demostrar cómo utilizar un controlador PID para mejorar el rendimiento del sistema.

#### 3.1.1. Descripción general del controlador PID.

Como ya se explicó, para la aplicación práctica se utiliza el controlador PID. Para lo cual se trabaja con el sistema de retroalimentación unitario, tal como se muestra en la figura 3.1. Se puede observar que en la salida del controlador PID, y al igual que la entrada de control a la planta, la ecuación unitaria que rige el controlador PID en el dominio de tiempo es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Ec. 3.1

En primer lugar, el controlador PID funciona como un sistema de bucle cerrado utilizando el esquema de la figura 3.1. La variable  $e(t)$  representa el error de seguimiento,  $r(t)$  la diferencia entre el valor de entrada deseado,  $y(t)$  la salida real. La señal  $e(t)$  será enviada al controlador PID, y el controlador calcula tanto la derivada como la integral de esta señal de error.



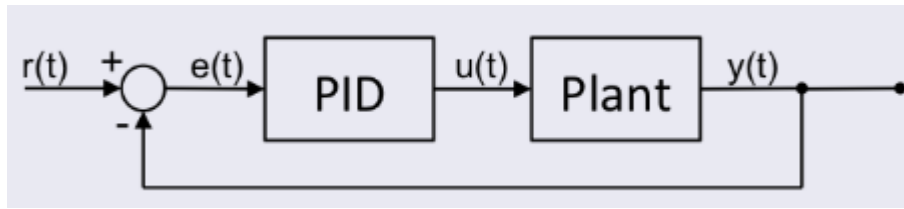


Figura 3. 1: Representación básica de un controlador PID  
 Fuente: (Johnson, Moradi, & Crowe, 2005)

La señal de control  $u(t)$  a la planta es igual a la ganancia proporcional ( $K_p$ ) por la magnitud del error  $e(t)$ , más la ganancia integral ( $K_i$ ) por la integral del error  $e(t)$ , más la ganancia derivada ( $K_d$ ) por la derivada del error  $e(t)$ . Posteriormente, la señal de control  $u(t)$  es enviada a la planta, y se obtiene la nueva salida  $y(t)$ . Después, la salida  $y(t)$  se retroalimenta y se compara con la referencia para encontrar la nueva señal de error  $e(t)$ . Luego, el controlador toma la nueva señal  $e(t)$  y calcula su derivada y su integral de nuevo, y su proceso continuo indefinidamente. Por lo tanto, la función de transferencia del controlador PID se encuentra aplicando la transformada de Laplace de la Ec. 3.1.

$$\mathcal{L}\{u(t)\} = \mathcal{L}\left\{K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}\right\}$$

$$u(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

Ec. 3.2

### 3.1.2. Simulación del controlador PID usando MatLab.

En esta sección se simula la parte de controladores desde el Command Window de MatLab. En la figura 3.2 se muestra los datos ingresados en MatLab para un único controlador P (Proporcional) cuya función de transferencia es:

$$\frac{1}{2s^2 + 10s + 1}$$

```
>> n=[1];
>> d=[2 10 1];
>> Wp=tf(n, d, 'iodelay', 2)

Wp =

          1
exp(-2*s) * ----
          2 s^2 + 10 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

Figura 3. 2: Función de transferencia para controlador proporcional.  
Elaborado por: Autor

Los valores de n= [1] y d= [2 10 1] corresponden a la parte del numerador y denominador de la función de transferencia, que se observa en la figura 3.2. Posteriormente, se ingresan los datos de las constantes del controlador PID. En la figura 3.3 se muestran los datos para las constantes Kp, Ki y Kd.

```
>> Kp=1;
>> Ki=0;
>> Kd=0;
>> Wc=pid(Kp, Ki, Kd)

Wc =

      Kp = 1

P-only controller.
```

Figura 3. 3: Valores asignados para un controlador proporcional.  
Elaborado por: Autor

En la figura 3.4 se muestra los datos correspondientes al proceso de retroalimentación (feedback). Esta parte consiste en multiplicar las variables correspondientes a la planta ( $W_p$ ) y del controlador ( $W_c$ ).

```
>> H=[1];
>> Yc=feedback(Wp*Wc,H)

Yc =

a =
      x1  x2
x1  -5  -1
x2   1   0

b =
      u1
x1  0.5
x2   0

c =
      x1  x2
y1   0   1

d =
      u1
y1   0

(values computed with all internal delays set to zero)

Internal delays (seconds): 2

Continuous-time state-space model.
```

Figura 3. 4: Respuesta del control proporcional con retroalimentación.  
Elaborado por: Autor

Finalmente, se va mostrar la gráfica (véase la figura 3.5) de la respuesta a la función escalón que corresponde a un controlador proporcional modelado en MatLab. Para ver la gráfica de la figura 3.5 se debe escribir desde el MatLab la siguiente instrucción:

```
>> step(Yc); grid on
```

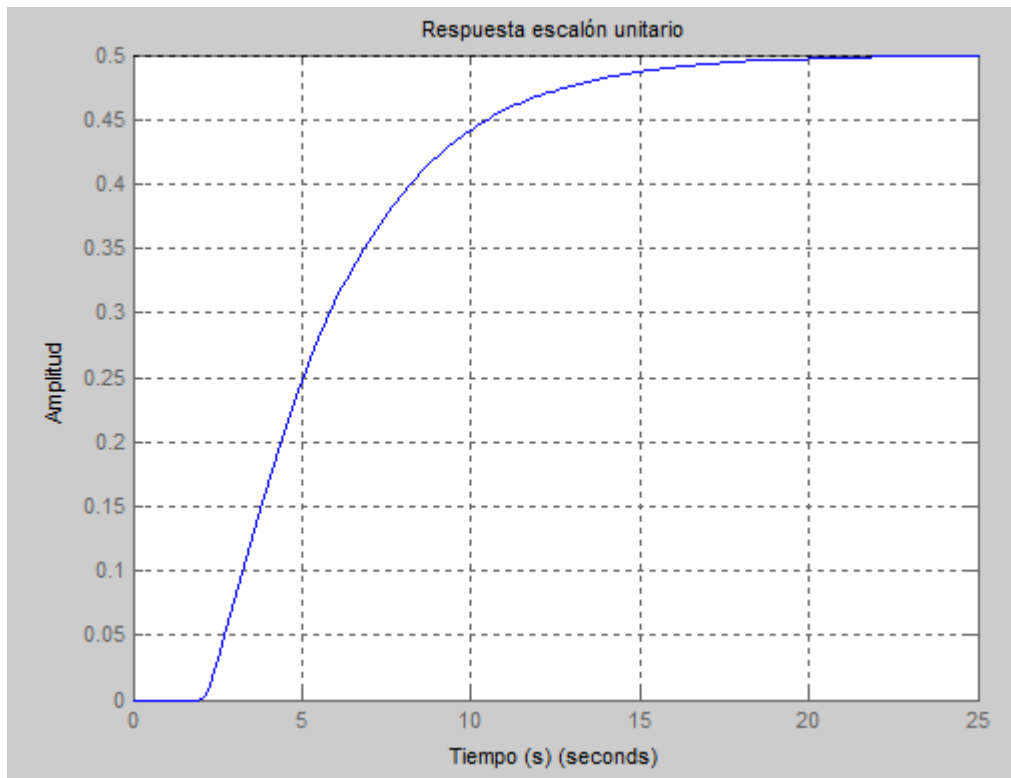


Figura 3. 5: Respuesta final del controlador proporcional.  
Elaborado por: Autor

De manera similar al controlador proporcional, ahora se procede a modelar para el controlador PID (véase la figura 3.6) y ver las diferencias en relación a la figura 3.5.

```
>> Kp=6;
>> Ki=1;
>> Kd=1;
>> Wc=pid(Kp, Ki, Kd)
```

Wc =

$$K_p + K_i * \frac{1}{s} + K_d * s$$

with Kp = 6, Ki = 1, Kd = 1

Continuous-time PID controller in parallel form.

Figura 3. 6: Valores asignados para un controlador PID.  
Elaborado por: Autor

En la figura 3.7 se muestra el resultado final del controlador PID, se nota una gran diferencia en relación al controlador proporcional.

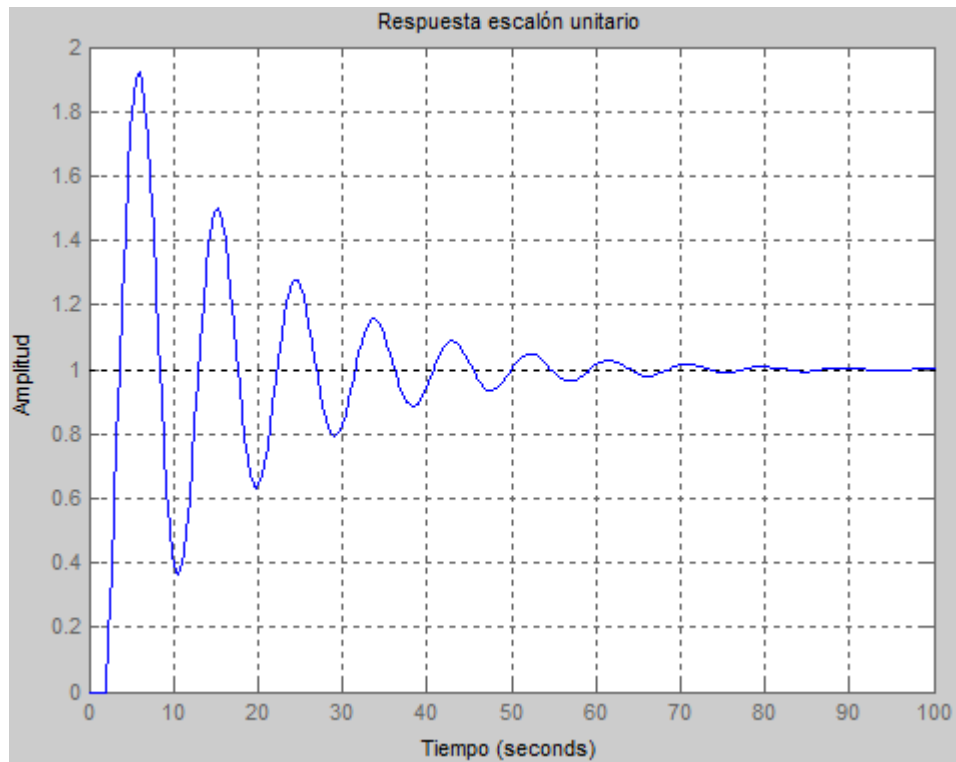


Figura 3. 7: Respuesta final del controlador PID.  
Elaborado por: Autor

### 3.1.3. Simulación del controlador PID usando Simulink.

Ahora se procede a realizar el modelado del controlador PID tratado en la sección 3.1.2, con la diferencia que se utiliza la plataforma Simulink. Como ya se explicó en el capítulo 2, Simulink es una herramienta robusta que permite simular diferentes aplicaciones, entre ellas los sistemas de controles. En la figura 3.8 se muestra el diagrama de bloques que permite modelar el controlador PID, cuyos elementos son los bloques: (a) constante (*constant*), (b) sumador, (c) controlador PID (*PID Controller*), retardo de transporte

(*Transport Delay*), (d) función de transferencia (*Transfer Fcn*), y (e) generador de señales (*Scope*) durante la simulación.

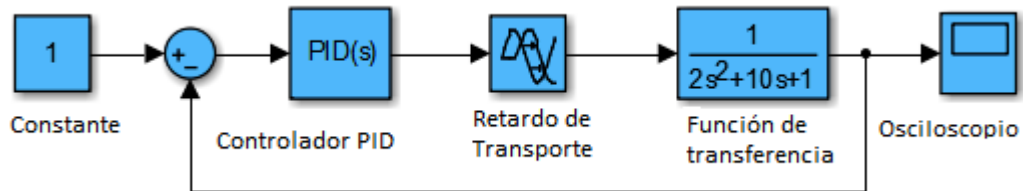


Figura 3. 8: Diagrama de bloques del controlador PID en simulink.  
Elaborado por: Autor

Las figuras 3.9 a 3.14 muestran los parámetros de configuración de los seis bloques utilizados en la figura 3.8 que corresponden al controlador PID. La figura 3.9 muestra los parámetros del bloque fuente: constante (*constant*), por default aparecen los valores y se mantienen para el modelado del PID. La figura 3.10 muestra los parámetros del bloque de función: suma (sum), que por lo general aparece así '|++' para lo cual es necesario se modifique a '|+-'.

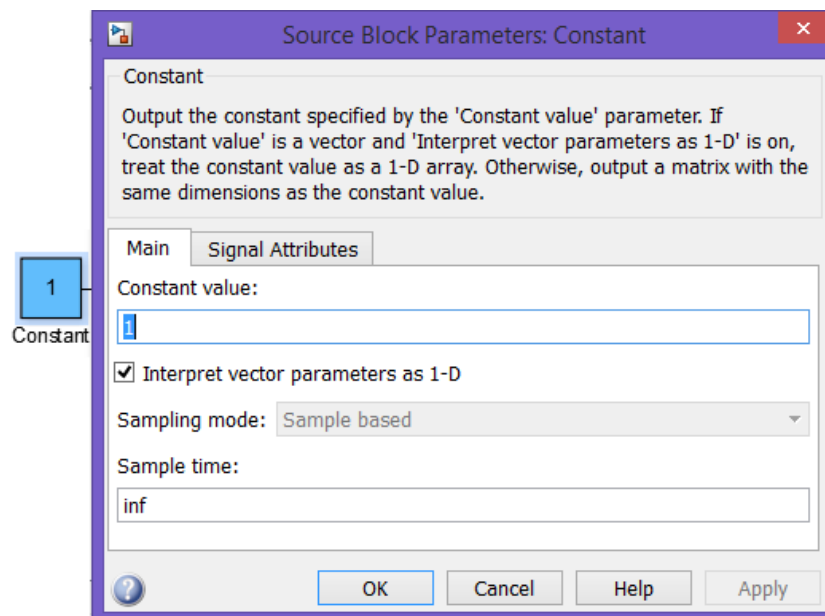


Figura 3. 9: Parámetros de configuración del bloque constante.  
Elaborado por: Autor

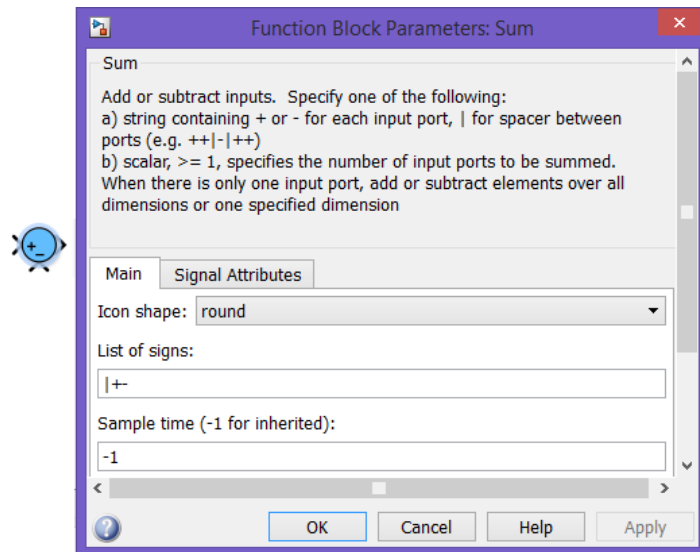


Figura 3. 10: Parámetros de configuración del bloque suma.  
Elaborado por: Autor

Los parámetros de configuración del bloque controlador PID se muestra en la figura 3.11. Los valores correspondientes de las constantes: (a) proporcional  $K_p=6$ , (b) integral  $K_i=1$ , y (c) derivativo  $K_d=1$ .

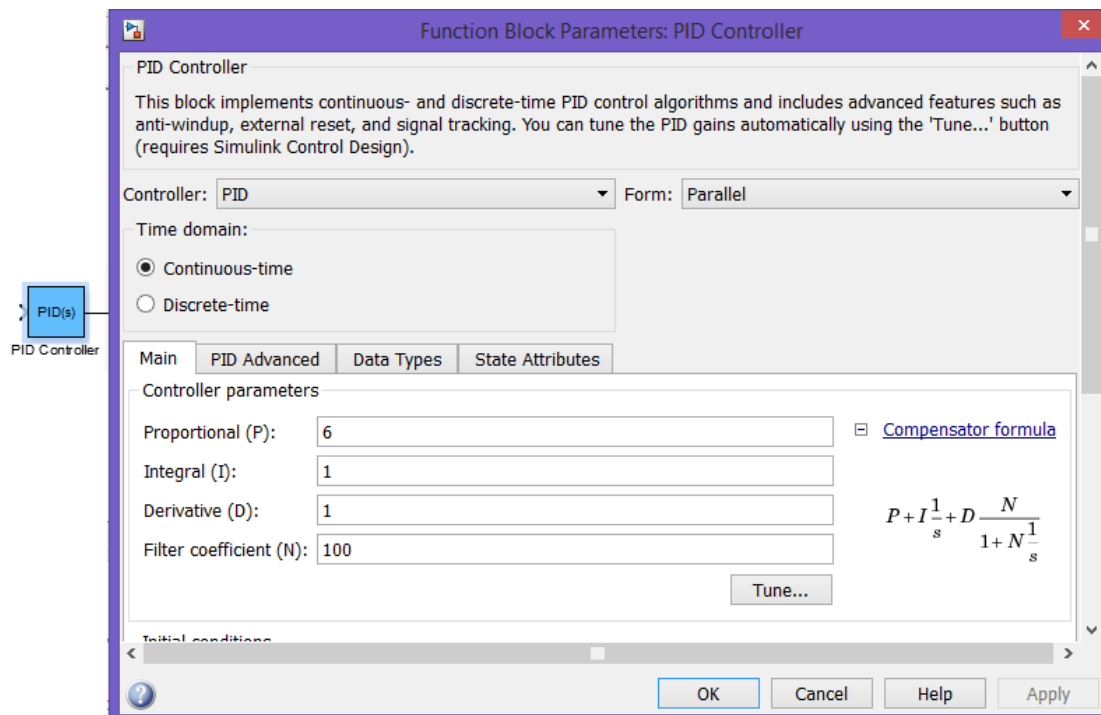


Figura 3. 11: Parámetros de configuración del bloque controlador PID.  
Elaborado por: Autor

El bloque controlador PID, no solamente modela controladores PID sino también, controladores: PI, PD, P e I, tal como se muestra en la figura 3.11. La figura 3.12 muestra el bloque de configuración de retardo especificado a la señal de entrada (se obtiene la mejor precisión cuando el retardo es mayor que el tamaño del paso de simulación). El valor de retardo es 2.

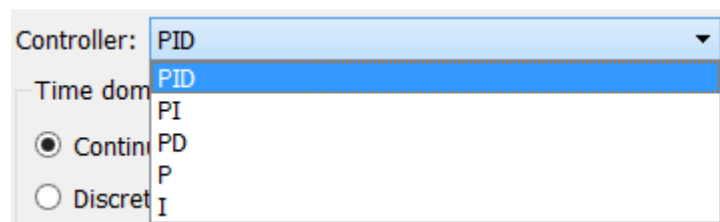


Figura 3. 12: Diferentes tipos de controladores PID, PI, PD, P e I.  
Elaborado por: Autor

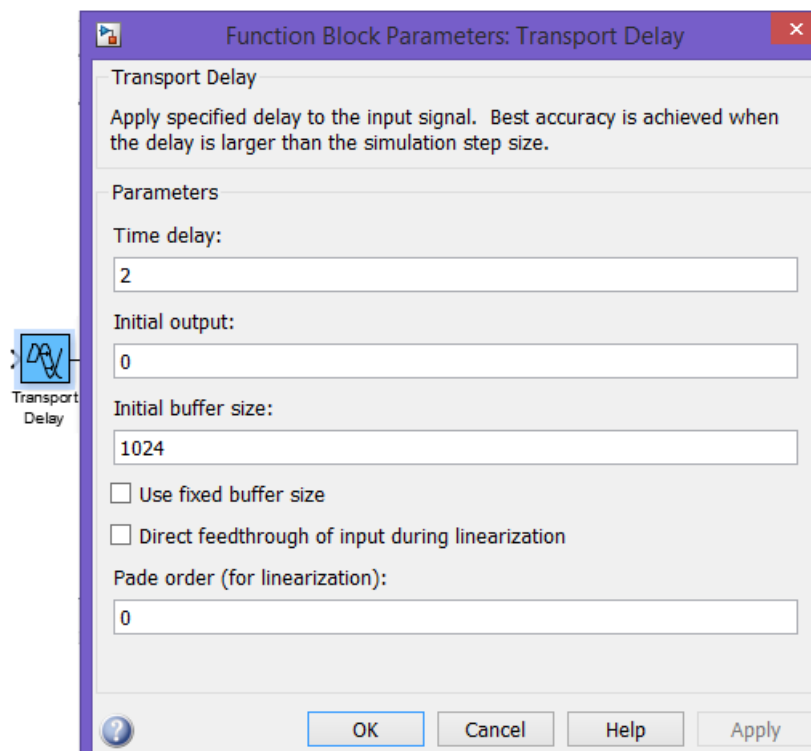


Figura 3. 13: Parámetros de configuración del bloque función de retardo.  
Elaborado por: Autor



Ahora, se procede a configurar los parámetros de la función de transferencia, tal como se muestra en la figura 3.14. El único valor de los coeficientes del numerador es [1], mientras que para los coeficientes del denominador son [2 10 1]. Estos últimos valores corresponden a una expresión de segundo orden.

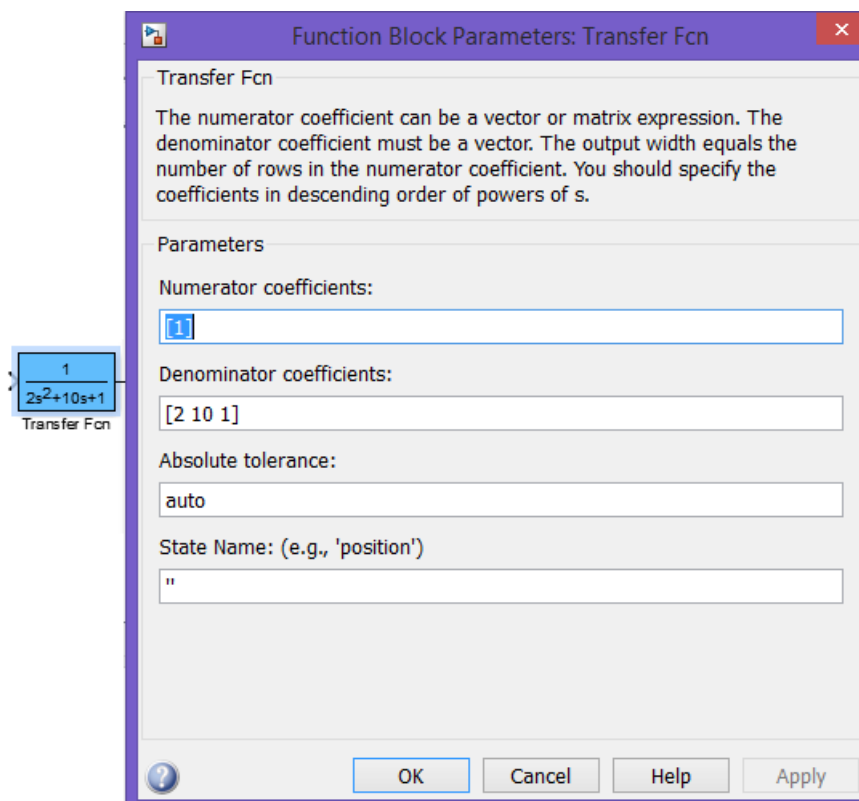


Figura 3. 14: Parámetros de configuración del bloque función de transferencia.  
Elaborado por: Autor

Finalmente, la figura 3.15 muestra la señal de visualización del sistema de control PID modelado en simulink (véase figura 3.8). Si comparamos con el modelado en MatLab tratado de la sección 3.1.2 (véase la figura 3.7), se concluye que el comportamiento de la respuesta de escalón es idéntico para un controlador PID (véase figura 3.8) cuyas constantes son:  $K_p=6$ ,  $K_i=1$  y  $K_d=1$ .

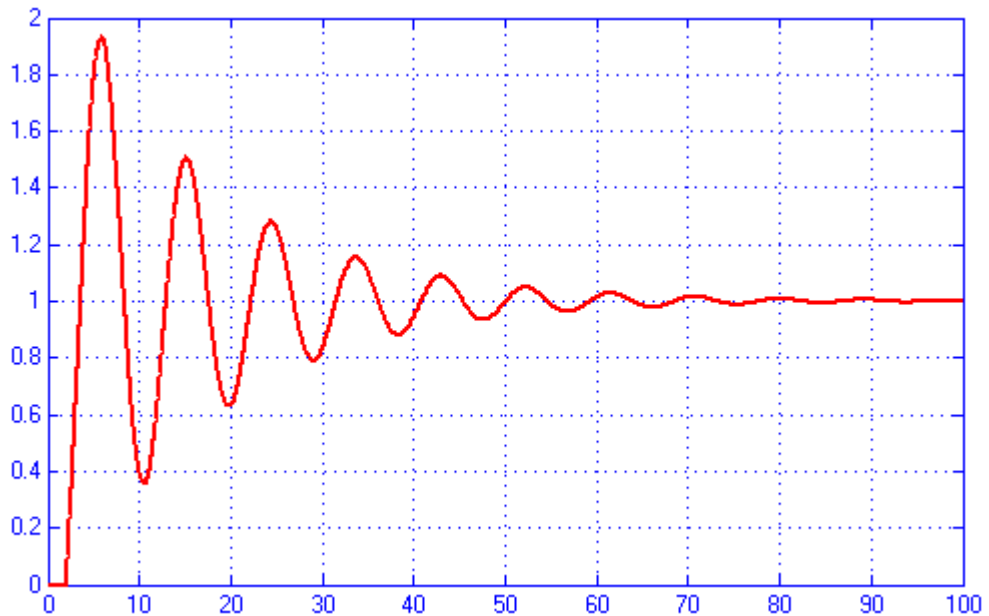


Figura 3. 15: Respuesta del controlador PID usando Simulink.  
Elaborado por: Autor

### 3.2. Aplicación práctica del sistema de control de velocidad.

En la sección 3.1 se realizó un análisis del diseño de sistemas de control PID. En esta sección se considera un modelado en tiempo lineal invariable (llamado LTI) para todos los dispositivos en el bucle de control. Se va considerar un sistema de control de velocidad, donde el actuador del motor es un amplificador de potencia. Este amplificador da un comportamiento de saturación si la entrada de señal de error al amplificador excede el valor de rango lineal.

Para la ejecución del modelado propuesto se utiliza MatLab/Simulink (siendo una poderosa herramienta de simulación) para simular los efectos de las no linealidades en un bucle de realimentación. Después de realizar el diseño usando modelos LTI, se debe probar el diseño usando simulación del

sistema de control real, que incluye las no linealidades de los dispositivos en el bucle de realimentación.

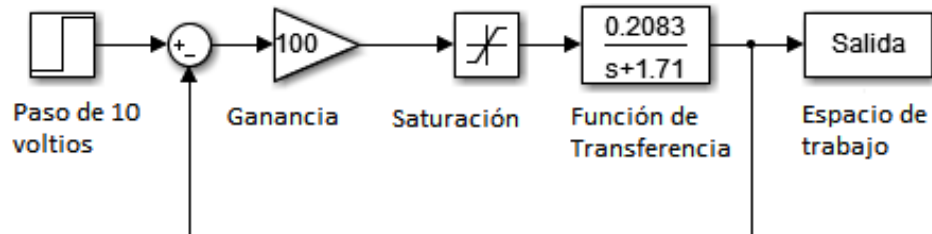


Figura 3. 16: Diagrama de bloques del controlador de velocidad de motor.  
Elaborado por: Autor

En la figura 3.16 se muestra el diagrama de bloques para la simulación del sistema de control de realimentación. Los parámetros de configuración para la ejecución del sistema son:

- a. ganancia del amplificador = 100, y
- b. función de transferencia del motor es:

$$\frac{0.2083}{s + 1.71}$$

Con un amplificador de ganancia igual a 100, logrando saturación en +5 o -5 V. En la figura 3.17 se muestra el resultado de la simulación del sistema de control de velocidad de motores. Todos los ajustes de los parámetros se pueden establecer haciendo doble clic en los bloques relacionados (visto en la sección 3.1). Los datos de respuesta de tiempo y salida se han transferido al espacio de trabajo utilizando el bloque <<To workspace>>. Un bloque de reloj se utiliza en el menú principal, estas variables se almacenan en la estructura <<Salida>> y <<Tiempo>> (véase figura 3.17).

```
>> Salida

Salida =

    time: []
  signals: [1x1 struct]
 blockName: 'simulacion2/To workspace'

>> Tiempo

Tiempo =

    time: []
  signals: [1x1 struct]
 blockName: 'simulacion2/To workspace1'

>> plot(Tiempo.signals.values,Salida.signals.values)
>> ylabel('Salida');
>> xlabel('Tiempo (s)');
>> title('Respuesta de paso');
>> legend('velocidad de motor');
```

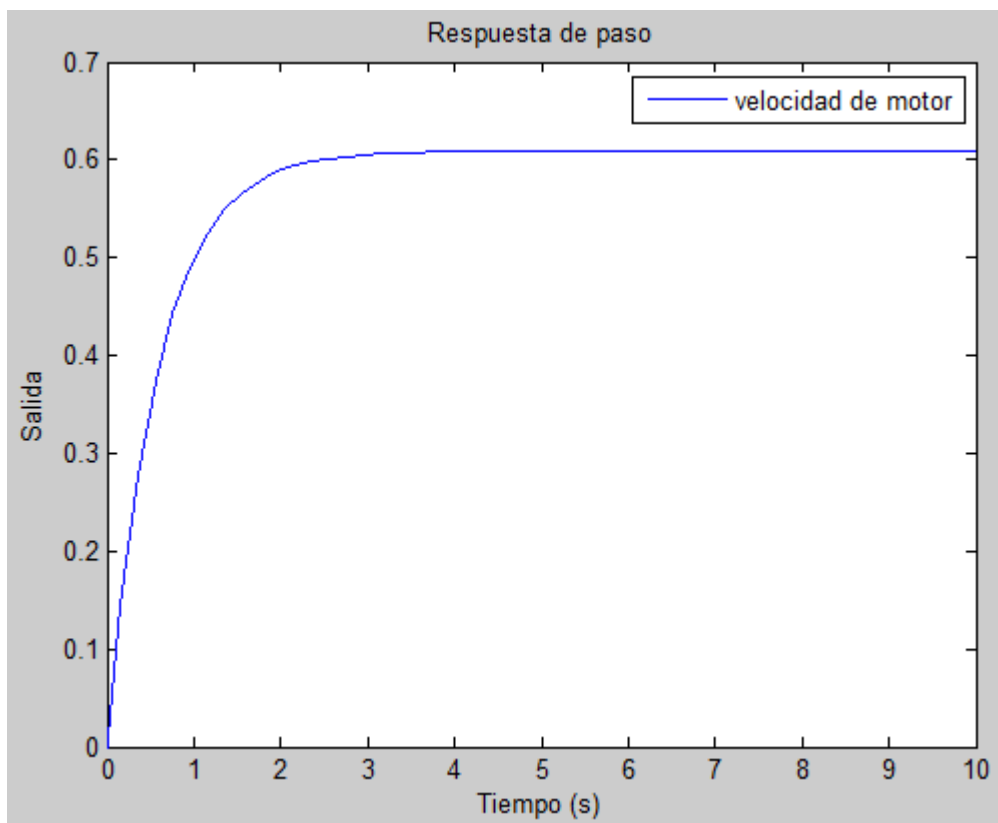


Figura 3. 17: Respuesta de paso del controlador de velocidad de motor.

Elaborado por: Autor

### 3.3. Aplicación práctica del modelado de un motor de corriente directa.

La presente sección se realiza el modelado de un motor DC que será accionado por una señal de entrada constante. Esta señal se aproxima a una señal modulada por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation, PWM*). El objetivo del modelado es observar el comportamiento de la corriente y del movimiento de rotación en la salida del motor.

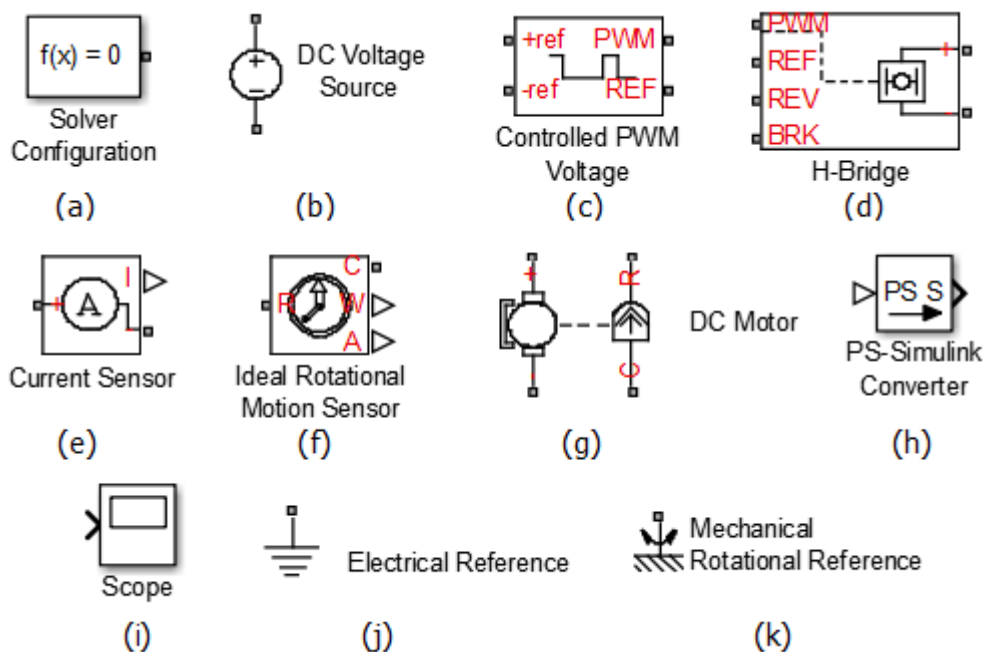


Figura 3. 18: Diagramas de bloques para modelado de un motor DC.

Elaborado por: Autor

A continuación, se van a seleccionar los bloques necesarios para el presente modelado:

a. **Solver Configuration** (véase figura 3.18 a):

Cada red física representada por diagramas de bloques *Simscape* (herramienta disponible en la librería de Simulink) conectados necesitan de información de configuración Solver para la

simulación. El bloque <<Solver Configuration>> especifica los parámetros que su modelado requiere necesita antes de ejecutar la simulación. Este bloque no requiere del ingreso de parámetros, mantener los valores predeterminados. (Mathworks, 2017h)

b. **DC Voltage Source** (véase figura 3.18 b):

La fuente de voltaje DC (siglas en inglés) o CC (siglas en español) representa a una fuente de voltaje ideal que mantiene un voltaje constante a través de sus terminales de salida, independientemente de la corriente que fluye a través de la fuente. El voltaje de salida es definido por el parámetro de voltaje constante (ya sea positivo o negativo), y puede ser cualquier valor real (Mathworks, 2017d). En la figura 3.19 se ingresa el valor 2.5 V del voltaje DC.

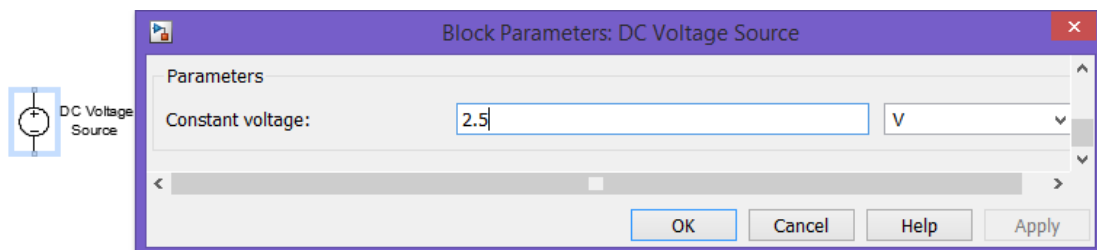


Figura 3. 19: Parámetros de configuración de fuente de voltaje DC.

Elaborado por: Autor

c. **Controlled PWM Voltage** (véase figura 3.18 c):

En la web de (Mathworks, 2017f) indica que este bloque representa una fuente de voltaje PWM a través de sus puertos PWM y REF que depende del voltaje de referencia  $V_{ref}$  a través de sus puertos +ref y -ref. El ciclo de trabajo en porcentaje está dado por:

$$100 \left( \frac{V_{ref} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right)$$

donde,

$V_{min}$  y  $V_{max}$  son los valores mínimo y máximo para  $V_{ref}$ .

El modo simulación se puede establecer en PWM o Promediado (*Averaged*). En modo PWM, la salida es una señal PWM. Mientras, que modo Promediado, la salida es constante con un valor igual a la señal PWM promediada. Para el presente modelado se utiliza una frecuencia PWM de 4 kHz y el modo de simulación se fija *Averaged*, tal como se presenta en la figura 3.20.

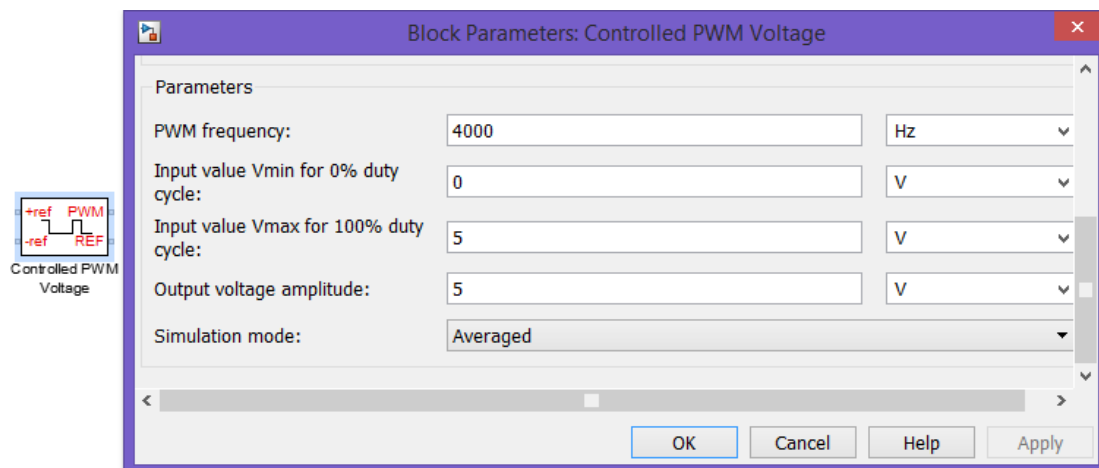


Figura 3. 20: Parámetros de configuración del control de voltaje PWM.

Elaborado por: Autor

d. **H-Bridge** (véase figura 3.18 d):

En (Mathworks, 2017e) este bloque representa un controlador de motor DC conocido normalmente como puente H. El bloque puede ser accionado por el bloque de voltaje PWM controlado en modo PWM o promediado (*Averaged*). En el modo PWM, el motor es alimentado si el voltaje V del puerto PWM está por encima del voltaje de umbral de habilitación. En modo *Averaged*, el voltaje de puerto PWM dividido por el parámetro de amplitud de señal PWM define la relación entre el tiempo de encendido y el período PWM.

La figura 3.21 muestra los parámetros de configuración del modo de simulación y supuestos de carga. Considerar que el modo simulación debe ser el mismo para el bloque de control de voltaje PWM.

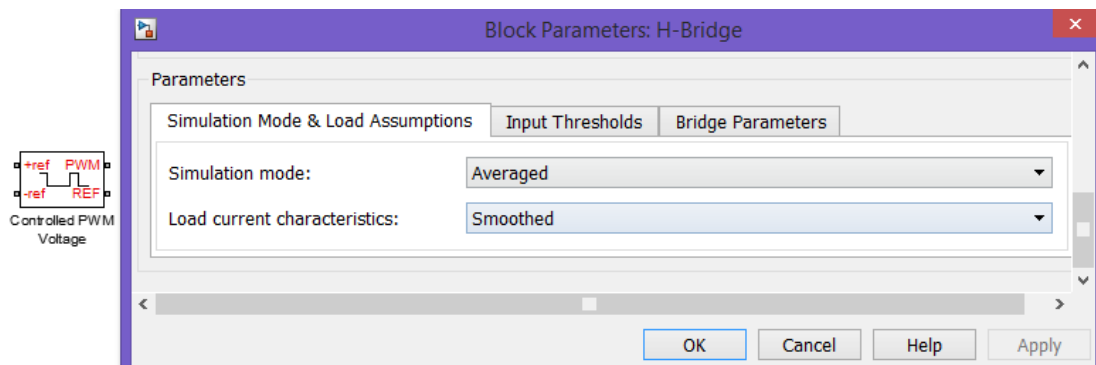


Figura 3. 21: Parámetros de configuración del modo de simulación y supuestos de carga del puente H.  
Elaborado por: Autor

Después se configuran los parámetros del umbral de entrada del puente H, tal como se muestra en la figura 3.22.

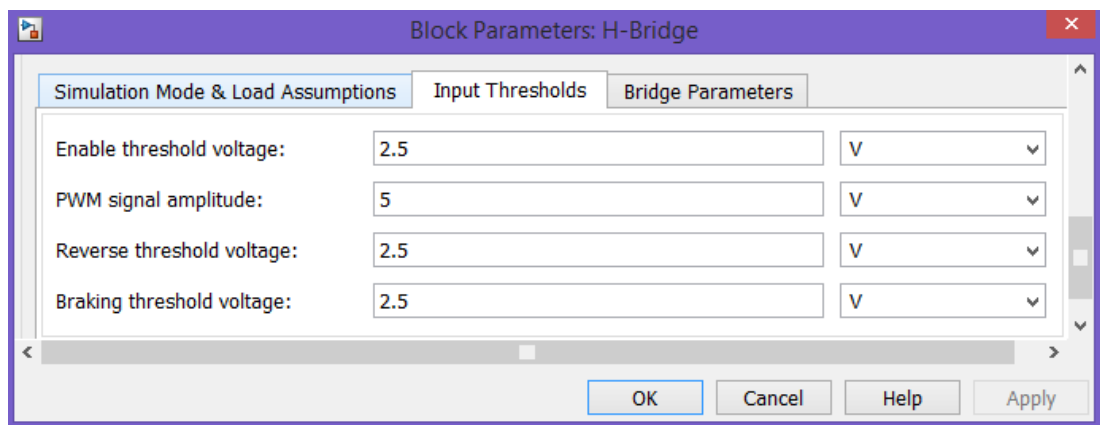


Figura 3. 22: Parámetros de configuración de umbral de entrada del puente H.  
Elaborado por: Autor

En la figura 3.23 se muestra los valores de la amplitud del voltaje de salida en 12 V, total del puente en resistencia  $0.1\Omega$  y el otro valor debe ser el mismo que viene preestablecido.



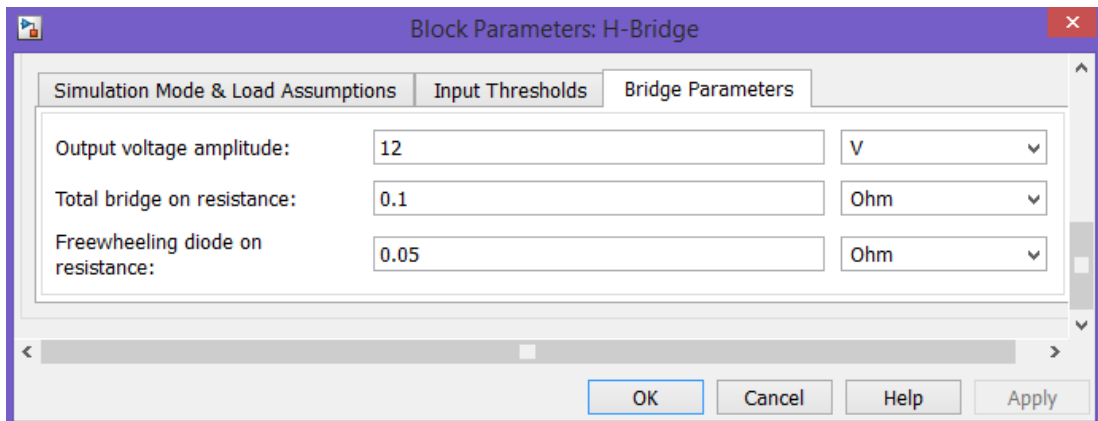


Figura 3. 23: Parámetros de configuración del puente.  
Elaborado por: Autor

e. **Current Sensor** (véase figura 3.18 e):

Este bloque representa un sensor de corriente ideal, es decir, un dispositivo que convierte la corriente medida en cualquier rama eléctrica en una señal física proporcional a la corriente. Las conexiones + y - son puertos eléctricos de conservación a través de los cuales el sensor se inserta en el circuito. La conexión I es un puerto de señal física que genera el resultado de la medición. (Mathworks, 2017a)

f. **Ideal Rotational Motion Sensor** (véase figura 3.18 f):

Este bloque representa un sensor de movimiento mecánico ideal, es decir, un dispositivo que convierte una variable transversal que se mide entre dos nodos mecánicos de rotación en una señal de control proporcional a la velocidad angular o ángulo. Puede especificar la posición angular inicial (offset) como un parámetro de bloque. El sensor es ideal ya que no tiene en cuenta la inercia, la fricción, los retardos, el consumo de energía, etc. (Mathworks,

2017g). En la figura 3.24 se muestra el valor del ángulo inicial igual a 0.

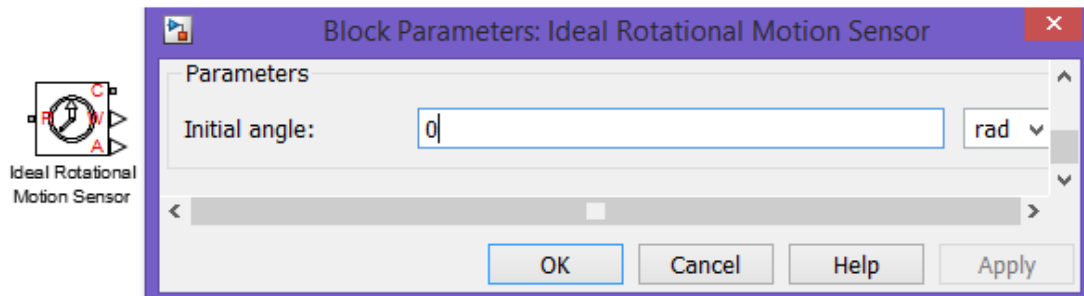


Figura 3. 24: Parámetros de configuración del ángulo inicial del sensor de movimiento mecánico.

Elaborado por: Autor

La figura 3.18 muestra las conexiones R y C, que son puertos mecánicos de conservación rotacional que conectan el bloque con los nodos cuyo movimiento son monitorizados. Las conexiones W y A son puertos de salida de señal física para velocidad y desplazamiento angular, respectivamente. La dirección positiva del bloque es desde el puerto R al puerto C. Esto significa que la velocidad se mide como  $\omega = \omega_R - \omega_C$ , donde  $\omega_R$  y  $\omega_C$  son las velocidades angulares absolutas en los puertos R y C, respectivamente.

g. **DC Motor** (véase figura 3.18 g):

El bloque de motor DC representa las características eléctricas y de par de un motor de corriente directa utilizando el modelo de circuito equivalente mostrado en la figura 3.25 (Mathworks, 2017b). En la figura 3.26 se muestran los valores correspondientes a los parámetros del torque eléctrico del motor DC. El modelo de

parametrización escogido es por potencia nominal, velocidad nominal y velocidad sin carga. El valor de la inductancia de armadura es 0.01 uH, la velocidad sin carga es 4000 rpm, velocidad nominal es 2500 rpm, carga nominal es 10 W, alimentación de voltaje DC nominal es 12 V, y la parametrización de amortiguación del rotor escogida es amortiguando el valor.

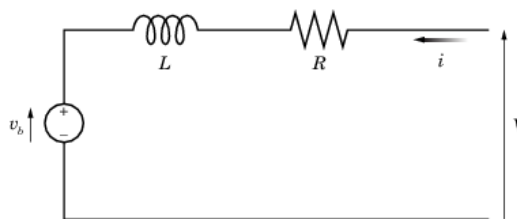


Figura 3. 25: Circuito equivalente para un motor DC.  
Fuente: (Mathworks, 2017b)

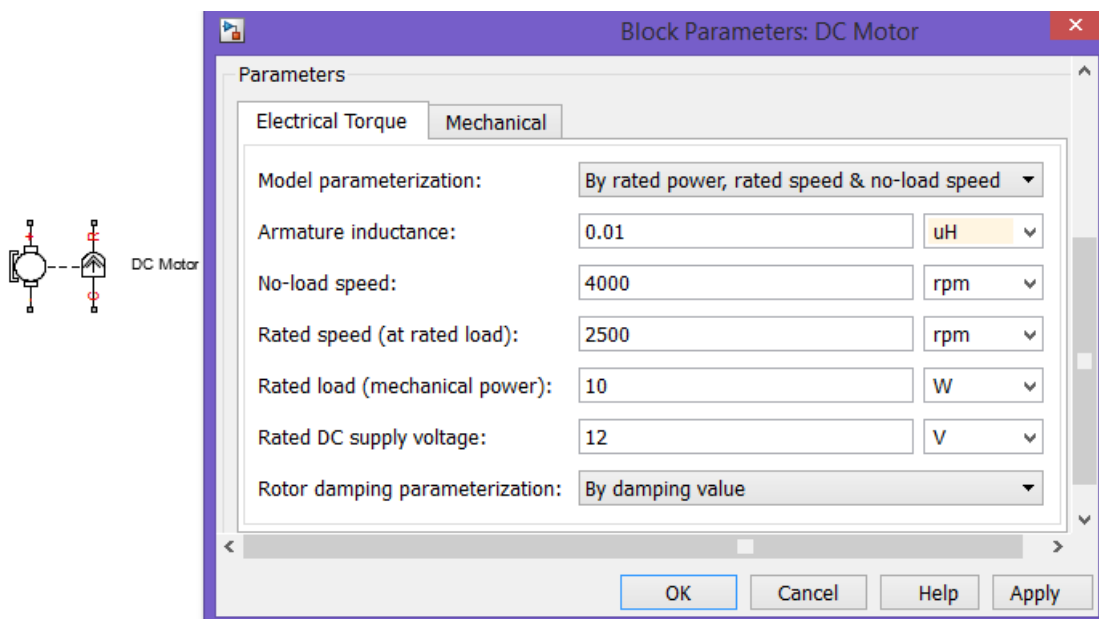


Figura 3. 26: Parámetros de configuración del torque eléctrico del motor DC.  
Elaborado por: Autor

Ahora se ingresan los valores correspondientes a los parámetros mecánicos del motor DC. En la figura 3.27 muestra los valores que serán ingresados en el modelado de esta sección. La inercia y

amortiguación del rotor, son fijados en  $2000 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$  y  $1 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad/s}}$  respectivamente. Mientras que el valor de velocidad inicial del rotor se mantiene el valor preestablecido en 0.

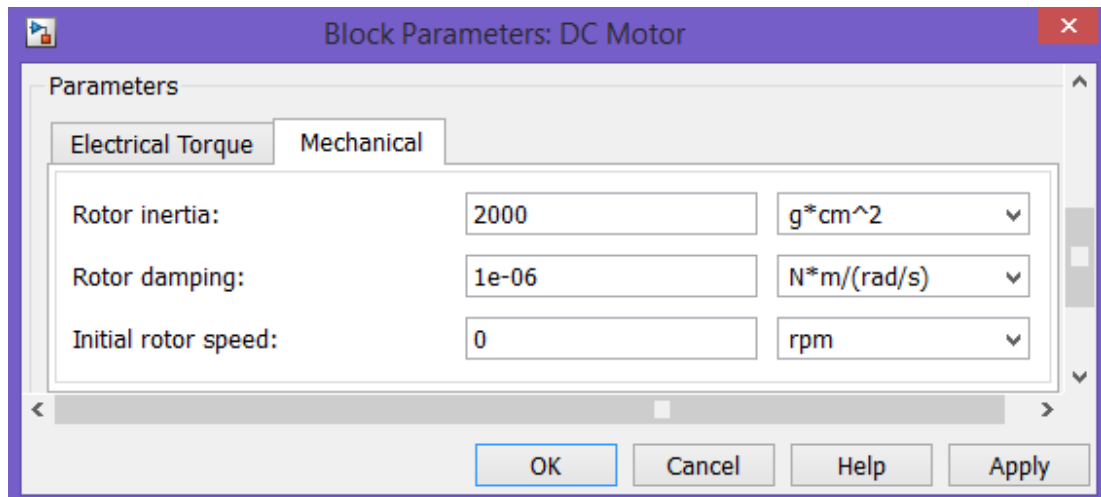


Figura 3. 27: Parámetros de configuración mecánica del motor DC.

Elaborado por: Autor

h. **PS-Simulink Converter** (véase figura 3.18 h):

El bloque convierte una señal física en una señal de salida. Este bloque es utilizado para conectar las salidas de un diagrama de red física del circuito a modelar (véase la figura 3.28) o también para otros bloques de Simulink.

i. **Scope** (véase figura 3.18 i):

Este bloque permite bosquejar las respuestas de señales en dominio del tiempo con relación al tiempo de ejecución de la simulación. La configuración de mostrar varias señales depende mucho del usuario y del tipo de aplicación que se está modelando. Las señales que se pueden generarse son continuas (basadas en

muestras) y discretas (basadas en muestras y tramas). (Mathworks, 2017c)

j. **Electrical Reference** (véase figura 3.18 j):

Este bloque no requiere del ingreso de parámetros, mantener los valores predeterminados.

k. **Mechanical Rotational Reference** (véase figura 3.18 k):

Este bloque no requiere del ingreso de parámetros, mantener los valores predeterminados.

Una vez explicado cada uno de los bloques que se utilizan en el modelado de un motor DC, también se incluyeron los parámetros de configuración de cada bloque. Finalmente, se realizan las conexiones necesarias para modelar el motor DC, tal como se muestra en la figura 3.28. Para proceder con la ejecución del modelado, es necesaria la configuración de los parámetros de solución. Todos los modelados de sistemas eléctricos y electrónicos utilizan soluciones de tiempo continuo. A continuación, se indican los valores de parametrización para la ejecución del modelado de un motor DC:

1. En la barra de herramientas de Simulink del modelo realizado, seleccionar **Simulation>Model Configuration Parameters** que permite abrir parámetros de configuración (Configuration Parameters).
2. Seleccione ode15s (Stiff / NDF) de la lista **Solver**.
3. Ingresar 1 para el valor de parámetro de tamaño de paso máximo (**Max step size**).

4. Clic en **OK**.

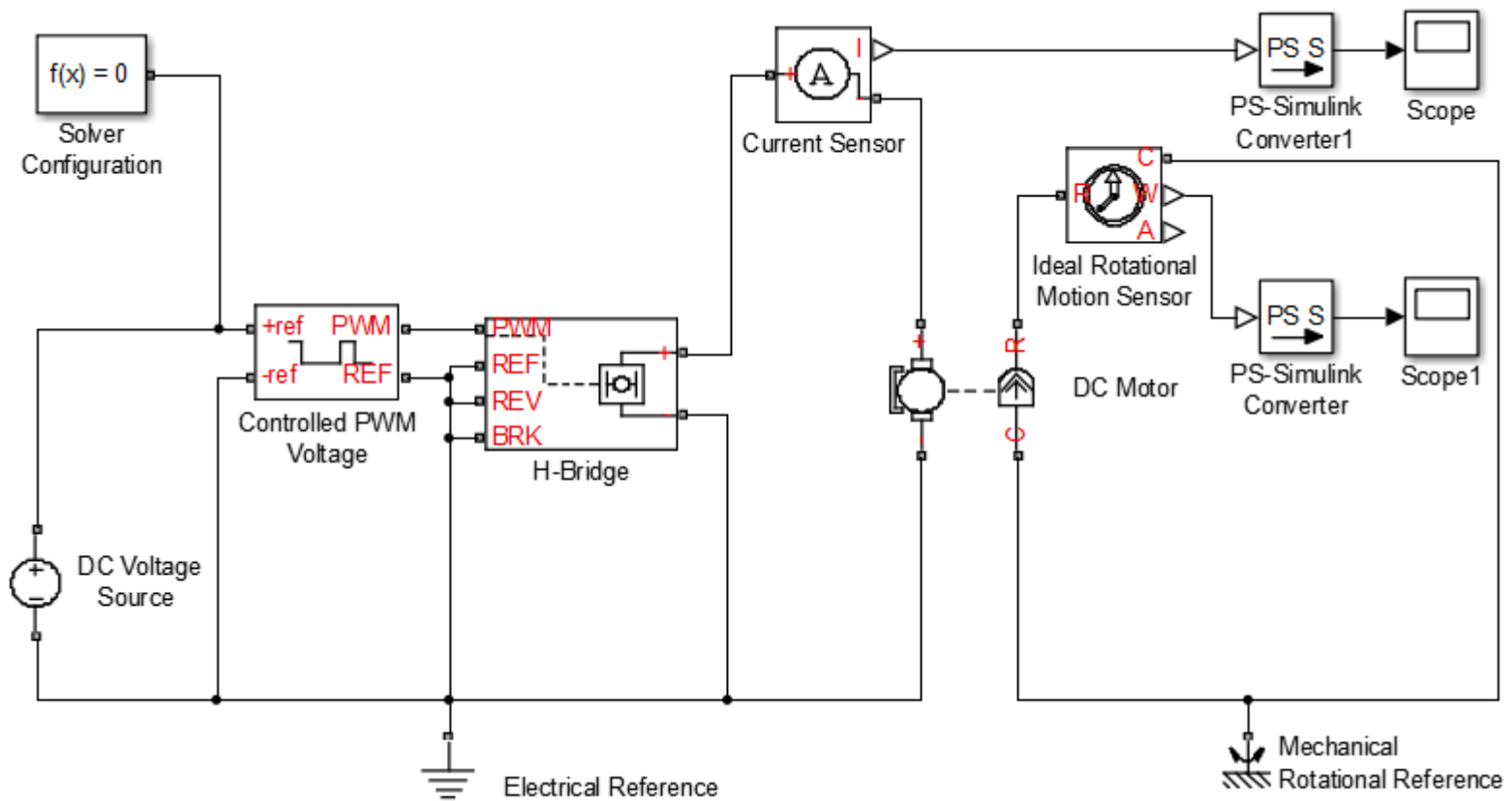


Figura 3. 28: Modelado en simulink de un motor DC.

Elaborado por: Autor

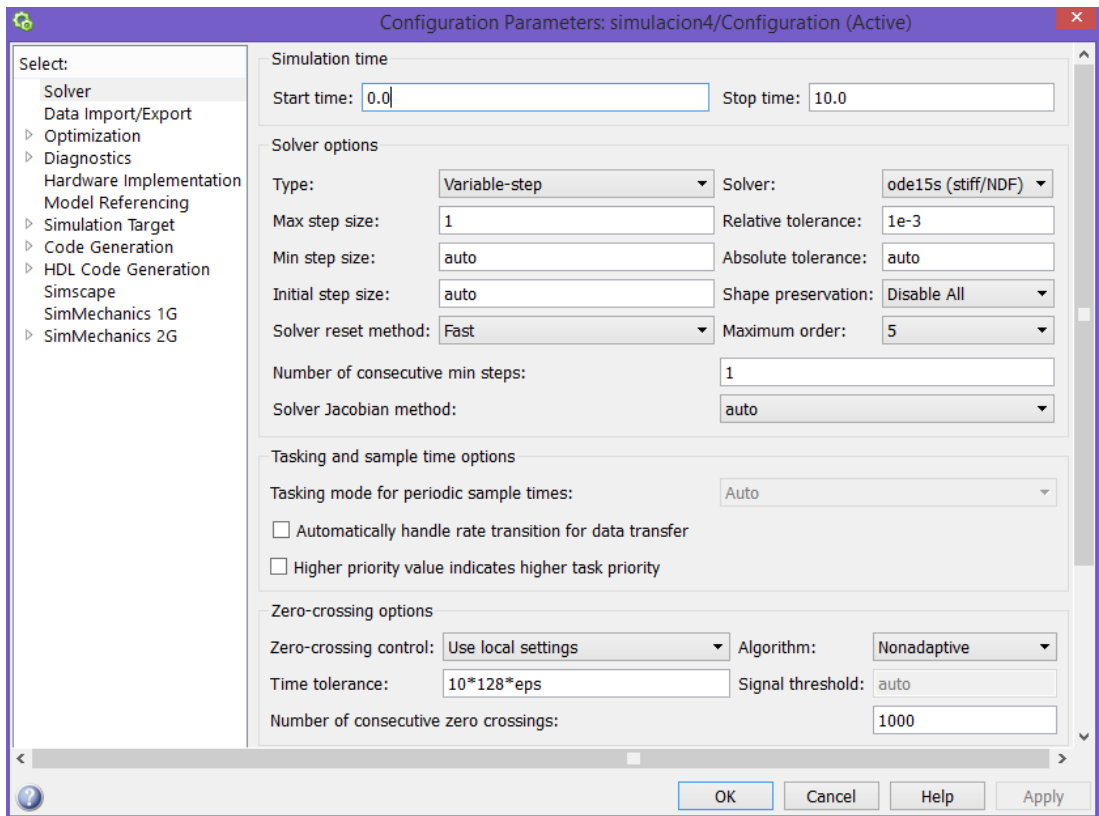


Figura 3. 29: Parámetros de configuración Solver para el modelado del motor DC.  
Elaborado por: Autor

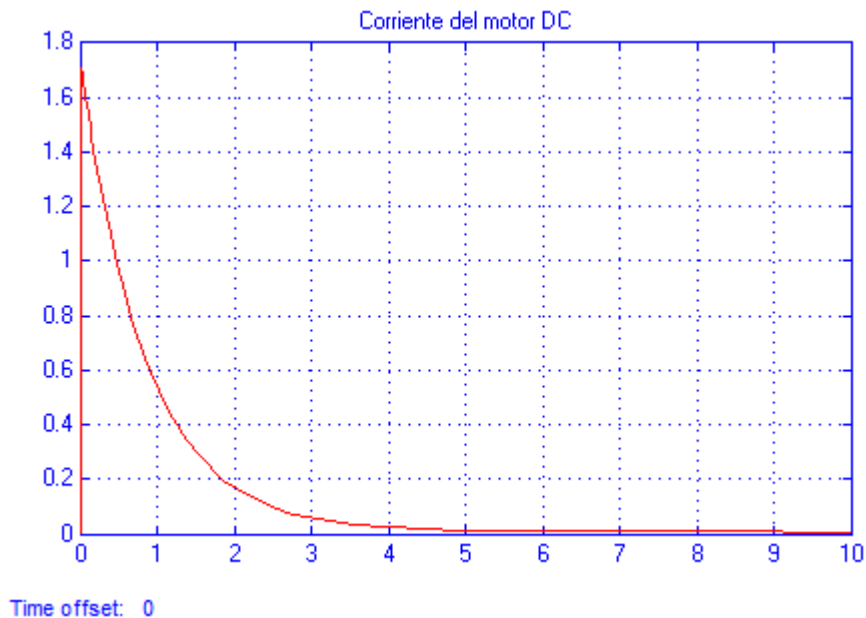


Figura 3. 30: Gráfica de corriente del motor DC.  
Elaborado por: Autor



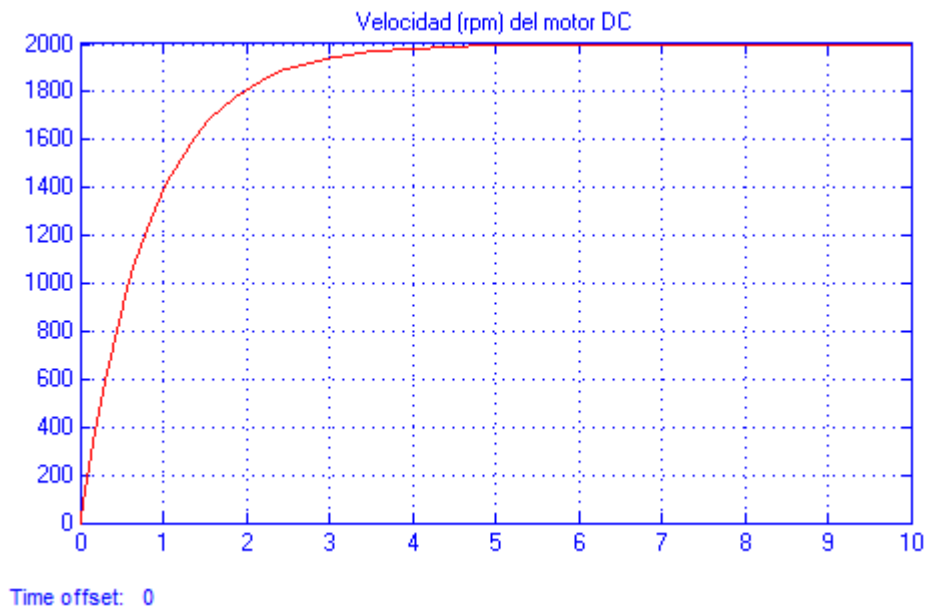


Figura 3. 31: Gráfica de velocidad del motor DC.  
Elaborado por: Autor

## **CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones.**

### **4.1. Conclusiones**

- Los sistemas de control en general nos permiten modelar dispositivos eléctricos y electrónicos. Se revisaron diferentes aplicaciones de sistemas de control en la ingeniería y sus respectivas clasificaciones, en especial el modelado de controladores PID. También se pudo constatar los diferentes trabajos que utilizan sistemas de control retroalimentados.
- La herramienta de simulación MatLab/Simulink fue descrita brevemente para justificar el modelado de sistemas de control en la carrera de Ingeniería Eléctrico Mecánica.
- Los diseños realizados del modelado de sistemas de control fueron realizados con éxito, ya que los escenarios modelados fueron correctamente ejecutados sin errores de compilación y cuyas respuestas satisfacen a la teoría. También, fueron explicados de tal manera que los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrico Mecánica puedan utilizar como una guía para el desarrollo de más aplicaciones o el desarrollo de nuevas propuestas de trabajos de titulación.
- Los resultados obtenidos en cada una de los tres escenarios de simulación fueron acordes a la parte teórica. Para el primer escenario, se evaluó el controlador PID en MatLab y Simulink, cuyos valores

obtenidos guardaban las mismas respuestas de acuerdo a las ganancias del controlador PID. Para el segundo escenario, se evaluó el sistema controlador retroalimentado de velocidad de motores DC, cuyo comportamiento de saturación fue corregido en la entrada de señal de error al amplificador no excedía el valor de rango lineal. Y en el último escenario, se modela el funcionamiento de un motor DC que se acciona por señales constantes denominada PWM, donde se observó el correcto comportamiento sin saturación del consumo de corriente y el comportamiento de la velocidad del motor.

#### **4.2. Recomendaciones.**

- Utilizar métodos de control adaptativo y predictivo utilizando simulación en MatLab/Simulink en las materias de la Carrera de Ingeniería Eléctrico Mecánica que permita mejorar las habilidades y capacidades para realizar modelos de redes eléctricas.
- Diseñar modelos de simulación en relación al fenómeno de ferro-resonancia en sistemas trifásicos.

## Bibliografía

- Adams, M. D. (2013). *Continuous-time signals and systems*. Victoria, Canada: University of Victoria.
- Benálcazar T., J. I., & Verduga F., G. A. (2013). Diseño e implementación de un sistema de control PID de posición de un motor de corriente continua por medio de hardware y software Matlab - Simulink para uso didáctico en la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1604>
- Bosch Roig, I., Gosálbez Castillo, J., Miralles Ricós, R., & Vergara Domínguez, L. (2015). *Señales y sistemas: teoría y problemas*. Valencia: UPV.
- Boylestad, R. L., Nashelsky, L., Navarro Salas, R., & Rodríguez Ramírez, F. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México: Pearson Prentice Hall.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2010). *Modern control systems* (12th ed). Prentice Hall: Pearson.
- Gil Rodríguez, M. (2015). *Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia e ingeniería*. Recuperado a partir de <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3171391>
- Hayt, W. H., Kemmerly, J. E., & Durbin, S. M. (2012). *Análisis de circuitos en ingeniería*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana. Recuperado a partir de <http://site.ebrary.com/id/10747914>
- Johnson, M. A., Moradi, M. H., & Crowe, J. (Eds.). (2005). *PID control: new identification and design methods*. New York: Springer.

Kamen, E. W., & Heck, B. S. (2010). Fundamentos de señales y sistemas usando la Web y MatLab. Pearson Educación.

Kiusalaas, J. (2005). *Numerical methods in engineering with MATLAB*. Cambridge [England] ; New York: Cambridge University Press.

MathWorks. (2013). *Discrete Data Plots*.

Mathworks. (2017a). Current sensor in electrical systems - MATLAB. Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de [https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/currentsensor.html?searchHighlight=Current%20sensor&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/currentsensor.html?searchHighlight=Current%20sensor&s_tid=doc_srchtile)

Mathworks. (2017b). DC motor model with electrical and torque characteristics - MATLAB. Recuperado el 13 de agosto de 2017, a partir de [https://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/dcmotor.html?searchHighlight=DC%20Motor&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/dcmotor.html?searchHighlight=DC%20Motor&s_tid=doc_srchtile)

Mathworks. (2017c). Display signals generated during simulation - Simulink. Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de [https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/scope.html?searchHighlight=Scope&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/scope.html?searchHighlight=Scope&s_tid=doc_srchtile)

Mathworks. (2017d). Ideal constant voltage source - MATLAB. Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de [https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/dcvoltagesource.html?searchHighlight=DC%20Voltage%20Source&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/dcvoltagesource.html?searchHighlight=DC%20Voltage%20Source&s_tid=doc_srchtile)

Mathworks. (2017e). Model H-bridge motor driver - MATLAB. Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de [https://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/hbridge.html?searchHighlight=H-Bridge&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/hbridge.html?searchHighlight=H-Bridge&s_tid=doc_srchtile)

- Mathworks. (2017f). Model pulse-width modulated voltage source - MATLAB. Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de [https://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/controlledpwmvoltage.html?searchHighlight=Controlled%20PWM%20Voltage&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/controlledpwmvoltage.html?searchHighlight=Controlled%20PWM%20Voltage&s_tid=doc_srchtile)
- Mathworks. (2017g). Motion sensor in mechanical rotational systems - MATLAB. Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de [https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/idealrotationalmotionsensor.html?searchHighlight=Ideal%20Rotational%20Motion%20Sensor&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/idealrotationalmotionsensor.html?searchHighlight=Ideal%20Rotational%20Motion%20Sensor&s_tid=doc_srchtile)
- Mathworks. (2017h). Physical Networks environment and solver configuration - MATLAB. Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/solverconfiguration.html>
- Rivera V., J. (2017). Diseño e implementación de un control PID en un sistema SCADA a través de las plataformas MatLab/Simulink y de instrumentación virtual LabView para motores DC utilizando un entrenador de planta de control. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7742>
- Svoboda, J. A., & Dorf, R. C. (2014). *Introduction to electric circuits* (9th edition). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc.
- Xue, D., & Chen, Y. (2014). *System simulation techniques with MATLAB and Simulink*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley.



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y

## AUTORIZACIÓN

Yo, **FLORES POVEDA, MIGUEL ÁNGEL** con C.C: # 0921950127 autor del Trabajo de Titulación: **Implementación de métodos matemáticos para la ingeniería en sistemas de control eléctrico usando MatLab/Simulink** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO** 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, 22 de septiembre de 2017

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

Nombre: Flores Poveda, Miguel Ángel  
C.C: 0921950127

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

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

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA LA INGENIERÍA EN SISTEMAS DE CONTROL ELÉCTRICO USANDO MATLAB/SIMULINK		
<b>AUTOR(ES)</b>	Flores Poveda, Miguel Ángel		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Romero Rosero, Carlos		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Eléctrico Mecánica		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Eléctrico Mecánica		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	22 de septiembre de 2017	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	76
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Controles Eléctricos y Controles Electrónicos		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Sistemas, Controladores, Bucles, Retroalimentado, Motores, PID		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>El presente trabajo de titulación consiste en realizar la implementación de métodos matemáticos mediante el modelamiento de escenarios de simulación de sistemas de control eléctrico utilizando la herramienta robusta MatLab/Simulink. Inicialmente se realiza una descripción general del trabajo donde se especifica los antecedentes del problema a investigar, definiendo las necesidades, planteando objetivos y la metodología de investigación que se utiliza en el trabajo de titulación. En el siguiente capítulo, se realiza la descripción teórica de los sistemas de control, así como los diferentes tipos de sistemas y de las diversas aplicaciones que se desarrollan en la ingeniería eléctrica y electrónica. También, se analiza brevemente el uso del software MatLab/Simulink y su utilidad en el desarrollo de sistemas controlados y retroalimentados. Finalmente, se desarrollaron tres escenarios de simulación de sistemas de control en MatLab y Simulink, lo que permitirá a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrico Mecánica el desarrollo de otras aplicaciones en el área de máquinas eléctricas y distribución eléctrica.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-981520673	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:mflores@mavesa.com.ec">mflores@mavesa.com.ec</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Philco Asqui Luis Orando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-68366762		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:luis.orlando@cu.ucsg.edu.ec">luis.orlando@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>			