



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TEMA:

**Desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en
MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo**

AUTOR:

Chávez Mora, Washington Bladimir

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO-MECÁNICO

TUTOR:

M. Sc. Bastidas Cabrera, Tomas Gaspar

Guayaquil, Ecuador

18 de septiembre del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **Chávez Mora, Washington Bladimir** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO ELÉCTRICO-MECÁNICO**.

TUTOR ??

M. Sc. Bastidas Cabrera, Tomas Gaspar

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Chávez Mora, Washington Bladimir**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “**Desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo**” 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 18 días del mes de septiembre del año 2020

EL AUTOR

Chávez Mora, Washington Bladimir



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Chávez Mora, Washington Bladimir**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2020

EL AUTOR

Chávez Mora, Washington Bladimir

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento: [TT Chavez W.docx](#) (D78257396)

Presentado: 2020-08-27 20:49 (-05:00)

Presentado por: washington10mora@hotmail.com

Recibido: edwin.palacios.ucsg@anaysis.orkund.com

Mensaje: Tesis Washington Chávez [Mostrar el mensaje completo](#)

3% de estas 26 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.

Lista de fuentes Bloques Fernando Palacios Meléndez (edwin_palacios)

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	Modelado e implementación de sistemas de...
	TT-Miguel-Flores-31-08-17 SDA.docx
	TT- Alex Dominguez - Final.docx
	https://de.slideshare.net/ivanterrel/a0239-...
	https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handl...
	http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/un...

Fuentes alternativas

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencias

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

ELÉCTRICO-MECÁNICA

TEMA:

Desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo

AUTOR: Chávez Mora, Washington Bladimir

Trabajo de Titulación previo a

la obtención del título de INGENIERO ELÉCTRICO-MECÁNICO

TUTOR: M. Sc. Bastidas Cabrera, Tomas Gaspar

Guayaquil, Ecuador

10 de Septiembre del 2020

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

TUTOR



M. Sc. Bastidas Cabrera, Tomas Gaspar

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón mi tesis a Dios que me ha permitido llegar a este punto importante de mi vida, me ha dado la fortaleza, sabiduría y perseverancia para lograr esta meta, a mis padres ANGEL HERNAN CHAVEZ y SANDRA MORA ROCAFUERTE quienes con su amor, consejos y su apoyo incondicional, me han ayudado a superar los obstáculos y a salir triunfante de cada adversidad, a mis hermanos INGRID, HERNAN, ANGEL, Y SANDRA por estar siempre a mi lado y ser mis mejores amigos, dándome ánimos para cumplir muchos logros.

EL AUTOR

Chávez Mora, Washington Bladimir

AGRADECIMIENTO

Primeramente, le agradezco a Dios por tenerme con vida, salud y energía para levantarme cada mañana para asistir a clases a adquirir nuevos conocimientos y experiencias durante mi carrera universitaria, por haberme guiado a lo largo de mi vida, por llenarme de motivación y fuerzas para salir adelante en momentos de debilidad.

A mis padres HERNAN CHAVEZ Y SANDRA MORA por ayudarme en todo momento, por ser el pilar fundamental y mi principal motivación para lograr cada una de mis metas.

A los docentes con los que eh tenido el gusto de conocer, por compartir sus conocimientos y experiencias que han sido la base para formarme profesionalmente.

EL AUTOR

Chávez Mora, Washington Bladimir



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESUS
DECANO

f. 

M. Sc. PHILCO ASQUI, LUIS ORLANDO
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando
OPONENTE

Índice General

Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición del Problema.....	4
1.4. Justificación del Problema.....	4
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
1.6. Hipótesis.....	5
1.7. Metodología de Investigación.....	5
Capítulo 2: Fundamentación Teórica	7
2.1. Introducción del modelado matemático de sistemas físicos.....	7
2.2. Modelado y simulación.....	8
2.3. Descripción general del modelado y análisis de sistemas.....	9
2.4. Modelado matemático de sistemas dinámicos.....	10
2.4.1. Primeros principios de modelado vs. modelado basada en datos.....	11
2.4.2. Función de transferencia y función de respuesta impulsiva....	15
2.4.3. Diagramas de bloques de sistemas.....	17
2.4.4. Modelado matemático de sistemas mecánicos.....	19
2.4.5. Modelado matemático de sistemas eléctricos.....	21
2.5. Entorno de simulación por diagrama de bloques – Simulink.....	24
2.5.1. Simulink para control de procesos.....	24
2.6. Entorno de simulación en Octave.....	28
Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados	31
3.1. Diseño de experimentación práctica 1: modelamiento matemático utilizando Simulink.....	31
3.2. Diseño de experimentación práctica 2: Tipos de sistemas de primer orden utilizando Simulink.....	34
3.3. Diseño de experimentación práctica 3: Tipos de sistemas de segundo orden utilizando entorno Octave.....	38
3.4. Diseño de experimentación práctica 4: Tipos de sistemas de segundo orden utilizando entorno Simulink.....	45

Conclusiones.....	55
Recomendaciones.....	56
Bibliografía	57

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama esquemático del modelo de sistemas dinámicos.	14
Figura 2. 2: Caracterización del sistema para obtención de función de transferencia.	15
Figura 2. 3: Combinación de sistemas en cascada para conexiones (a) en serie, (b) en paralelo y (c) de retroalimentación de dos sistemas lineales. ..	18
Figura 2. 4: Representación del sistema mecánico de desplazamiento lineal.	20
Figura 2. 5: Representación de un circuito RLC en serie.	22
Figura 2. 6: Representación de un circuito RLC en paralelo.	23
Figura 2. 7: Ventanas del entorno de simulación MatLab y librería de Simulink.	24
Figura 2. 8: Ventanas del entorno de simulación Simulink.	25
Figura 2. 9: Ventana de la librería “Continuous” en el entorno de Simulink. ..	26
Figura 2. 10: Ventana de la librería “Sinks” en el entorno de Simulink.	26
Figura 2. 11: Ventana de la librería “Sources” en el entorno de Simulink.	27
Figura 2. 12: Ventana de la librería “Signal Routing” en el entorno de Simulink.	27
Figura 2. 13: Ventana de la librería “Math Operations” en el entorno de Simulink.	28
Figura 2. 14: Ventana principal del entorno de simulación Octave Online. ..	29

Capítulo 3

Figura 3. 1: Diagrama de bloques del escenario 1 para la aplicación práctica 1.	31
Figura 3. 2: Señal de salida $x(t)$ en el osciloscopio para el escenario 1.	32
Figura 3. 3: Diagrama de bloques del escenario 2 para la aplicación práctica 1.	33
Figura 3. 4: Configuración de parámetros del bloque función de transferencia del escenario 2.	33

Figura 3. 5: Señal de salida $x(t)$ en el osciloscopio para el escenario 2.	34
Figura 3. 6: (a) Diagrama de bloques de un sistema de primer orden; (b) Diagrama de bloques simplificado.	35
Figura 3. 7: Sistema de control de bucle abierto en Simulink.	36
Figura 3. 8: Sistema de control de bucle cerrado en Simulink.	36
Figura 3. 9: Respuesta al escalón para el sistema de control de bucle abierto.	37
Figura 3. 10: Respuesta al escalón para el sistema de control de bucle cerrado.	37
Figura 3. 11: Gráfica del sistema mecánico.	38
Figura 3. 12: Código de programación para los datos de entrada de la ecuación 9.	41
Figura 3. 13: Código de programación para las matrices A, B, C y D dadas en las ecuaciones 9 y 10.	42
Figura 3. 14: Generación de las matrices A, B, C y D con valores designados para las ecuaciones 9 y 10.	42
Figura 3. 15: Código de programación para la generación de espacio de estados, funciones de transferencia y de respuestas temporal y natural.	43
Figura 3. 16: Generación de modelo de espacio de estados.	43
Figura 3. 17: Generación de ecuaciones de la función de transferencia.	44
Figura 3. 18: Resultados obtenidos de la simulación del sistema mecánico.	44
Figura 3. 19: Circuito esquemático del circuito RLC.	45
Figura 3. 20: Circuito equivalente del circuito RLC.	45
Figura 3. 21: Ventana de inicio de Simulink para creación de un nuevo modelo por bloques.	46
Figura 3. 22: Ventana de la librería de bloques de Simulink para implementación de la FDT.	47
Figura 3. 23: Implementación del sistema de control mediante función de transferencia.	47
Figura 3. 24: Configuración de parámetros del bloque de función de paso unitario.	48
Figura 3. 25: Configuración de parámetros del bloque de función de transferencia.	48

Figura 3. 26: Resultado obtenido de la implementación del sistema de control mediante función de transferencia.....	49
Figura 3. 27: Script de MatLab para análisis del tiempo del circuito RLC.....	50
Figura 3. 28: Señal de respuesta de salida para $v_C(t)$	51
Figura 3. 29: Sistema de control para simulación mediante espacio de estados.....	52
Figura 3. 30: Configuración de parámetros del bloque de espacio de estados.	53
Figura 3. 31: Señal de salida del sistema de ecuaciones de estados para V_C	53

Resumen

Este documento del trabajo de titulación para obtener el grado académico de Ingeniero Eléctrico-Mecánico presenta el desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo. Para cumplir con el propósito del desarrollo de sistemas de control en Simulink, se tuvo que revisar la parte teórica del modelado matemático de sistemas dinámicos, en especial los mecánicos (2da Ley de Newton, fuerzas en el resorte y amortiguadas) y eléctricos (análisis de circuitos eléctricos en el dominio del tiempo y frecuencia), de ecuaciones diferenciales y la transformada de Laplace, así como también de los entornos de simulación apropiados para modelar los sistemas de control tratados en el capítulo 3, que son MatLab/Simulink y Octave. La mayoría de los problemas en esta asignación se pueden manejar directamente con un comando o función de MatLab/Simulink y Octave apropiado. Para los problemas que requieren el cálculo de una respuesta escalonada de lineal invariante en el tiempo (LTI), se pueden obtener soluciones analíticas utilizando transformadas de Laplace. Estas dos herramientas fueron utilizadas para el desarrollo de las cuatro aplicaciones prácticas que servirán para la formación de futuros ingenieros en electricidad en la materia de control y automatismo.

Palabras claves: SISTEMAS, CONTROL, ESTADOS, MODELADO, SIMULACIÓN, PARÁMETROS

Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación

En este capítulo se presenta la definición de la problemática, así como los antecedentes relacionados al modelado matemático de sistemas, objetivo general, objetivos específicos y la metodología de investigación que se utiliza.

1.1. Introducción.

Los modelos matemáticos pueden asumir muchas formas diferentes dependiendo de las circunstancias particulares. Por ejemplo, en problemas de control óptimo, es bueno utilizar representaciones de espacio de estados. Por otro lado, para el análisis de respuesta transitoria o de respuesta de frecuencia de sistemas lineales invariantes en el tiempo de entrada y salida únicas, la representación de la función de transferencia puede ser más conveniente que cualquier otra.

Una vez que se obtiene un modelo matemático de un sistema, se pueden utilizar varias técnicas analíticas y computacionales con fines de análisis y síntesis. Dado que los sistemas considerados son de naturaleza dinámica, las ecuaciones suelen ser ecuaciones diferenciales. Si estas ecuaciones se pueden linealizar, entonces se puede utilizar la transformada de Laplace para simplificar el método de solución.

El sistema se utiliza para describir una combinación de componentes que pueden ser físicos o no. El modelo matemático describe el sistema en términos de concepto matemático. El proceso de desarrollo de Modelis matemático conocido como Modelado Matemático. El modelado es el proceso de escribir una ecuación diferencial para describir una situación física. La base para el modelo matemático es proporcionada por las leyes físicas fundamentales que gobiernan el comportamiento del sistema. Utiliza leyes como la ley de Kirchoff para el sistema eléctrico, la ley de Newton para el sistema mecánico. (Patil & More, 2014)

En resumen, el enfoque para los problemas del sistema dinámico puede enumerarse de la siguiente manera:

- Definir el sistema y sus componentes.
- Formule el modelo matemático y enumere los supuestos necesarios.
- Escribe las ecuaciones diferenciales que describen el modelo.
- Resolver las ecuaciones para las variables de salida deseadas.
- Examine las soluciones y los supuestos.
- Si es necesario, vuelva a analizar o rediseñar el sistema.

1.2. Antecedentes.

El modelado matemático de sistemas dinámicos, ya sean mecánicos, eléctricos, electromecánicos, electrónica de potencia, mecatrónicos, térmicos, hidráulicos, fluidos, entre otros son abordados en el desarrollo de simulaciones mediante código de programación (MatLab, Octave y Python), así como mediante diagramas de bloques (Simulink) y de instrumentos virtuales (LabVIEW). En el repositorio de la carrera de eléctrico-mecánica no se han desarrollado proyectos de aplicación práctica como ayuda a la enseñanza de asignaturas que traten a los sistemas de control automático mediante el desarrollo de modelos matemáticos y el uso de entornos de simulación robustos.

Durante la búsqueda de información del modelado matemático de sistemas dinámicos, se encontraron trabajos publicados en revistas donde han desarrollado diferentes aplicaciones, como por ejemplo, Badr, (2017) presenta su trabajo “Modelado y simulación de sistemas mecánicos y eléctricos análogos”. En este artículo el autor realiza una breve revisión de la analogía entre sistema mecánico y eléctrico. El circuito eléctrico analógico contiene una combinación en serie de elementos eléctricos como resistor, inductor y condensador, así como la fuente de voltaje. Por ejemplo, implementó un circuito RLC para llevar a cabo el modelo análogo del sistema mecánico formado por sistemas de resortes de masa y amortiguador. La revisión incluye las ecuaciones matemáticas derivadas requeridas y la implementación del modelo de controlador de los sistemas de analogía. A partir del modelo matemático obtuvo las funciones de transferencia relativas de los dos sistemas seleccionados y la simulación fue implementada en el software Matlab/Simulink. Los esquemas de controlador clásico (PID) con la

combinación de los modelos de controlador proporcional, integral y derivado fueron empleados para investigar el mejor rendimiento del sistema eléctrico simulado.

De manera similar a Badr, (2017) se encontró el artículo de Bhondge et al., (2015) en la cual las ecuaciones diferenciales son la herramienta básica para los muchos sistemas de modelado matemático. La versatilidad de las ecuaciones diferenciales permite aplicar el área a una variedad de temas, desde la física hasta el crecimiento de la población y el mercado de valores. En este artículo discuten el modelado matemático de sistemas mecánicos y eléctricos a las ecuaciones diferenciales. También muestran cómo interpretar el Sistema Mecánico y Eléctrico, cómo usarlo y resolverlo.

También los autores Baykov & Gordeev, (2016) desarrollaron el “Modelo matemático de un sistema electromecánico con disipatividad variable”. Este artículo considera el modelo matemático de un sistema de dos motores eléctricos. La validez del modelo se confirma como el análisis del balance de potencia en el estado estacionario con una carga estática, y el análisis del proceso transitorio de sincronización del eje a diferentes coeficientes de disipación. El modelo permite evaluar el consumo de energía eléctrica de un motor eléctrico en proceso transitorio.

1.3. Definición del Problema.

El modelado matemático de sistemas dinámicos no solamente se debe basar en la representación matemática de algún fenómeno físico, como los sistemas mecánicos, eléctricos, nivel de tanques, hidráulicos y entre otros, sino también que sean simulados mediante algún entorno de programación o simulación. Por esto, es necesario el desarrollo e implementación de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos para la asignatura de Control y Automatismo utilizando los entornos de simulación MatLab/Simulink y Octave.

1.4. Justificación del Problema.

Los principios para el modelado matemático de una serie de sistemas dinámicos, incluidos los mecánicos, con ejemplos y aplicaciones de

controladores lineales y no lineales son tratados y desarrollados por (Bolton, 2015; Dorf & Bishop, 2008; Ogata, 2010)

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Desarrollar aplicaciones prácticas del modelado matemático de sistemas mecánicos y eléctricos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Describir las bases fundamentales del modelado matemático de sistemas dinámicos y de los entornos de simulación MatLab/Simulink y Octave.
- Diseñar aplicaciones de sistemas dinámicos para la implementación de prácticas de laboratorio en entornos de simulación en la asignatura de Control y Automatismo.
- Evaluar las simulaciones desarrolladas a partir de modelado matemático de los sistemas dinámicos diseñados.

1.6. Hipótesis.

Con el desarrollo de aplicaciones prácticas en MatLab/Simulink y Octave se espera contribuir a los estudiantes de Ingeniería en Electricidad con herramientas de ayuda al aprendizaje en la asignatura de control y automatismo y también permitirá que se puedan proponer otras aplicaciones de los sistemas de control y automatismo utilizando un entorno de simulación gratuito como Octave o MatLab/Simulink.

1.7. Metodología de Investigación.

La investigación es una búsqueda lógica y sistemática de información nueva y útil sobre un tema en particular. La investigación es importante tanto en campos científicos como no científicos. En la vida ocurren cada día nuevos problemas, eventos, fenómenos y procesos. Prácticamente, se requieren soluciones y sugerencias implementables para abordar los nuevos problemas

que surgen. Los científicos deben investigar sobre ellos y encontrar sus causas, soluciones, explicaciones y aplicaciones.

La investigación se clasifica ampliamente en dos clases principales:

1. Investigación fundamental o básica y
2. Investigación aplicada.

Las investigaciones básicas y aplicadas son generalmente de dos tipos: investigación normal e investigación revolucionaria. En cualquier campo en particular, la investigación normal se realiza de acuerdo con un conjunto de reglas, conceptos y procedimientos llamados paradigma, que es bien aceptado por los científicos que trabajan en ese campo. Además, las investigaciones básicas y aplicadas pueden ser cuantitativas o cualitativas o incluso ambas (investigación mixta).

El presente trabajo es un tipo de investigación formativa o básica, y que el tipo de investigación se basa en teorías, modelos y simulaciones matemáticas cuyos datos obtenidos son cuantitativos y permiten verificar los resultados obtenidos con los teóricos.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica

En este capítulo se describe las bases teóricas del modelado matemático de sistemas dinámicos (mecánico y eléctrico), incluyendo la representación de ecuaciones de estados, y finalmente se presenta una breve descripción de los entornos de simulación Simulink y Octave. Este último se puede emplear para simulaciones de forma online y no requiere de licencias.

2.1. Introducción del modelado matemático de sistemas físicos.

Para el análisis y diseño de sistemas de control, se necesita formular una descripción matemática del sistema. El proceso de obtención de la descripción matemática deseada del sistema se conoce como "modelado". Los modelos básicos de los sistemas físicos dinámicos son ecuaciones diferenciales obtenidas mediante la aplicación de las leyes apropiadas de la naturaleza. Estas ecuaciones pueden ser lineales o no lineales dependiendo de los fenómenos que se modelen.

Las ecuaciones diferenciales son un inconveniente para el análisis y las manipulaciones del diseño, por lo que es necesario utilizar Transformación de Laplace que convierte las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas. Las ecuaciones algebraicas se pueden poner en forma de función de transferencia y el sistema se modela gráficamente como un diagrama de bloques de función de transferencia, ya sea utilizando código de programación o el entorno Simulink. Aunque, de manera alternativa se puede utilizar un gráfico de flujo de señales.

Este capítulo trata de ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia y diagramas de bloques de diferentes sistemas físicos, a saber, sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos, neumáticos y térmicos. Aunque el presente trabaja se centrará en el desarrollo de escenarios para sistemas mecánicos y eléctrico, utilizando MatLab/Simulink y Octave. El análisis de un sistema dinámico requiere la capacidad de predecir su desempeño. Esta capacidad y la precisión de los resultados dependen de qué tan bien se puedan expresar matemáticamente las características de cada componente.

Una de las tareas más importantes en el análisis y diseño de sistemas de control es el modelado matemático de los sistemas. Los dos métodos más comunes son el enfoque de función de transferencia y el enfoque de ecuación de estado. El método de la función de transferencia es válido solo para sistemas lineales invariantes en el tiempo, mientras que las ecuaciones de estado son de primer orden para usar funciones de transferencia y ecuaciones de estado lineal, el sistema primero debe linealizarse o su rango de operación debe limitarse a un rango lineal.

Aunque el análisis y diseño de los sistemas de control lineal han sido bien desarrollados, sus contrapartes para los sistemas no lineales suelen ser muy complejos. Por lo tanto, el futuro ingeniero en electricidad debe tener la experticia de operar con sistemas de control y que a menudo tiene la tarea de determinar no solo cómo describir matemáticamente con precisión un sistema, sino también, lo que es más importante, cómo hacer suposiciones y aproximaciones adecuadas, siempre que sea necesario, para que el sistema pueda caracterizarse adecuadamente por un modelo matemático lineal.

2.2. Modelado y simulación.

La simulación en general es pretender que uno se enfrenta a algo real mientras se trabaja realmente con una imitación. En la investigación de operaciones, la imitación es un modelo informático de la realidad simulada. Un simulador de vuelo en una PC es también un modelo informático de algunos aspectos del vuelo: muestra en la pantalla los controles y lo que se supone que el "piloto" (el joven que lo opera) debe ver desde la "cabina".

¿Por qué utilizar modelos? volar en un simulador es más seguro y económico que el avión real. Precisamente por esta razón, los modelos se utilizan en la industria comercial y militar: es muy costoso, peligroso y, a menudo, imposible realizar experimentos con sistemas reales. Siempre que los modelos sean descripciones adecuadas de la realidad (son válidas), experimentar con ellos puede ahorrar dinero, sufrimiento e incluso tiempo.

¿Cuándo utilizar simulaciones? Los sistemas que cambian con el tiempo, como una gasolinera donde los coches van y vienen (llamados sistemas dinámicos) e implican aleatoriedad. Nadie puede adivinar exactamente a qué hora debería llegar el próximo coche a la estación, son buenos candidatos para la simulación. El modelado de sistemas dinámicos complejos necesita teóricamente demasiadas simplificaciones y, por lo tanto, los modelos emergentes pueden no ser válidos. La simulación no requiere tantos supuestos simplificadores, por lo que es la única herramienta incluso en ausencia de aleatoriedad.

¿Cómo simular? Suponer que estamos interesados en una gasolinera. Se puede describir el comportamiento de este sistema gráficamente trazando el número de autos en la estación; el estado del sistema. Cada vez que llega un automóvil, el gráfico aumenta en una unidad, mientras que un automóvil que sale hace que el gráfico baje una unidad. Este gráfico (llamado ruta de muestra), podría obtenerse de la observación de una estación real, pero también podría construirse artificialmente. Dicha construcción artificial y el análisis de la ruta de muestra resultante (o más rutas de muestra en casos más complejos) consiste en la simulación.

La ruta de muestra anterior consistía solo en líneas horizontales y verticales, ya que las llegadas y salidas de automóviles ocurrieron en distintos puntos de tiempo, lo que toma el nombre de eventos. Entre dos eventos consecutivos, no sucede nada: el gráfico es horizontal. Cuando el número de eventos es finito, llamamos a la simulación "evento discreto". En algunos sistemas, el estado cambia todo el tiempo, no solo en el momento de algunos eventos discretos. Por ejemplo, el nivel del agua en un depósito con entradas y salidas dadas puede cambiar todo el tiempo. En tales casos, la "simulación continua" es más apropiada, aunque la simulación de eventos discretos puede servir como una aproximación.

2.3. Descripción general del modelado y análisis de sistemas.

El paso fundamental para realizar análisis de sistemas y diseño de control en sistemas mecánicos, eléctricos y de energía es el modelado

matemático. Es decir, se busca escribir las ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) que describen la física del sistema de interés. Este proceso no es trivial y requiere una cuidadosa combinación de primeros principios (por ejemplo, física, química, termodinámica), experiencia y creatividad.

Una vez que estas ecuaciones se derivan correctamente, entonces se formulará la dinámica del sistema en una forma llamada "espacio de estado". La forma del espacio de estado es la plantilla canónica para el análisis y el control. Los modelos de espacio de estados se pueden dividir en sistemas lineales y no lineales.

En el presente trabajo de titulación se centrará en los sistemas lineales y en cómo pueden derivarse de sistemas no lineales. El siguiente y último concepto fundamental es la "estabilidad". La estabilidad, en términos generales, significa por ejemplo que en sistemas energéticos no "explota" en algún sentido. Las siguientes secciones, describen brevemente:

- a. El modelado matemático de sistemas dinámicos
- b. Representaciones de espacio de estados
- c. Simulación de modelos matemáticos usando MatLab/Simulink y Octave

2.4. Modelado matemático de sistemas dinámicos.

Los sistemas de energía convierten y almacenan energía de una variedad de dominios físicos, como mecánica (por ejemplo, volante), eléctrica (por ejemplo, ultra capacitor), hidráulica (por ejemplo, acumulador), química (por ejemplo, gasolina), térmica (por ejemplo, almacenamiento de hielo), nuclear (por ejemplo, la energía que une un núcleo de uranio), económica (por ejemplo, cuenta bancaria) y más.

Como tal, los ingenieros y científicos necesitan un marco común para describir y analizar los sistemas energéticos. Este marco común son las matemáticas, y nos referimos a nuestra descripción de los sistemas de energía dinámica como un modelo matemático. Uno debe entender que un modelo matemático es, en el mejor de los casos, un sustituto del sistema

físico, cuya precisión está sujeta a los supuestos y requisitos hechos por el futuro ingeniero. Según el Dr. George E. P. Box (1919 - 2013): "Esencialmente, todos los modelos son incorrectos, pero algunos son útiles".

2.4.1. Primeros principios de modelado vs. modelado basada en datos.

El proceso de traducir un sistema energético técnico (o no técnico) no estructurado en un modelo matemático preciso y claramente definido está lejos de ser trivial. En muchos casos, ya existe un conjunto bien establecido de modelos. En otros casos, se debe generar un modelo para nuestro propósito. Por lo tanto, se debe seguir una metodología para la generación de modelos.

Desafortunadamente, tal metodología no puede ser "algorítmica" en el sentido de que ofrecería una receta que, cuando se sigue exactamente, está garantizada para producir el mejor modelo posible. El proceso de abstracción de un sistema de energía complejo a un modelo matemático simplemente no es susceptible de un grado tan alto de formalización. En muchos casos, es una "forma de arte" que requiere experiencia e intuición. No obstante, esta sección proporciona algunos conceptos útiles para la generación de modelos.

El enfoque a continuación estará en los "modelos orientados al control", es decir, modelos que capturan los principales fenómenos estáticos y dinámicos de un sistema, sin crear una carga computacional excesiva. La razón principal de este requisito es que se supone que los modelos se utilizan repetidamente en cálculos numéricos (por ejemplo, al optimizar el diseño del sistema o señales de control anticipado) o en bucles en tiempo real (por ejemplo, en sistemas de control de retroalimentación). En términos más simples, se anticipa el uso de estos modelos orientados al control para la planificación y/o la operación, donde se desea simplicidad computacional.

Los científicos suelen perseguir un paradigma de modelización contrastante. Es decir, un científico a menudo estudia el mundo natural o creado por el hombre para teorizar relaciones matemáticas que expliquen sus observaciones. Cuanto más preciso y detallado sea el modelo, mejor. En este

trabajo, se sigue el consejo de Albert Einstein: "Todo debe hacerse lo más simple posible, pero no más simple". Es decir, el modelo matemático debe ser lo suficientemente detallado para adaptarse a los objetivos específicos del presente trabajo de titulación.

La síntesis de modelos de sistemas de energía se basa a menudo en primeros principios físicos, por ejemplo, la primera y segunda leyes de la termodinámica, las leyes de Kirchhoff en circuitos de corriente directa y alterna, las ecuaciones de Lagrange en mecánica, las ecuaciones de Maxwell en electromagnetismo o la ley de Navier-Stokes en mecánica de fluidos. En comparación con los métodos basados en datos (por ejemplo, métodos de correlación), este enfoque tiene al menos cuatro beneficios principales:

- Los modelos obtenidos son explicativos, a diferencia de los modelos basados en datos, que buscan hacer coincidir las predicciones de entrada y salida con los datos, los modelos de primer principio explican la dinámica interna. Esto proporciona una visión de ingeniería mejorada del sistema energético, una propiedad particularmente agradable cuando un alto rendimiento de seguridad es fundamental.
- Los modelos obtenidos son, en principio, capaces de extrapolar el comportamiento del sistema. Es decir, pueden ser útiles más allá de las condiciones operativas utilizadas en la validación del modelo.
- Los modelos se pueden formular incluso si el sistema real no está disponible (el sistema aún está en fase de planificación o es demasiado peligroso/caro para utilizarlo en experimentos).
- Una vez que existe tal modelo matemático para un primer sistema, la adaptación de ese modelo a modificaciones menores del sistema es relativamente fácil. Los siguientes diseños de controladores, que se basan en el modelo del sistema, se pueden realizar (casi) automáticamente. Este enfoque de ahorro de tiempo es fundamental para la aplicación en el mundo real.

En el mundo actualmente es rico en datos, los modelos basados en datos (también conocidos como modelos de caja negra, aprendizaje automático o inteligencia artificial) han recibido un interés renovado. Los

ejemplos incluyen redes neuronales artificiales, redes de aprendizaje profundo, modelos de series de tiempo, bosques aleatorios, máquinas de vectores de soporte y más. A diferencia de los modelos de primeros principios, los modelos basados en datos no intentan modelar las características internas. En cambio, se enfocan en hacer coincidir el comportamiento de entrada-salida con los datos de observación. Los modelos basados en datos tienen varias ventajas y desventajas, que incluyen:

- La síntesis de modelos basada en datos generalmente no requiere que uno comprenda fundamentalmente el proceso subyacente. Esto permite la escalabilidad y la generalización en cierto sentido. Sin embargo, está expuesto a errores o mal uso.
- Los modelos basados en datos pueden predecir procesos que carecen de principios básicos bien entendidos. Los ejemplos incluyen el comportamiento humano, como las tasas de clics en anuncios, el consumo de energía de carga del enchufe, los comportamientos de movilidad y más. También pueden predecir comportamientos difíciles de modelar con primeros principios, como la generación de energía eólica en presencia de ráfagas de viento, la generación de energía solar en presencia de nubes, etc.
- Los modelos basados en datos se entrenan y validan con datos. Como resultado, no hay garantía de predicciones precisas fuera del régimen de datos de entrenamiento. Por tanto, la extrapolación es una debilidad.

Hay que tener en cuenta que la filosofía de modelado no necesita ser binaria, es decir, elegir modelado en blanco o negro. Este trabajo de titulación promueve un enfoque de modelado de sistemas dinámicos. Aunque, se puede generar otro trabajo de modelamiento basados en datos cuando sea necesario.

La figura 2.1 proporciona un diagrama de bloques esquemático de un modelo de sistema dinámico genérico que evoluciona en el tiempo t . El sistema, denotado por Σ , se caracteriza por un conjunto de variables de estado $x(t)$. Las variables de estado están influenciadas por las variables de

entrada $u(t)$ que representan la acción (controlada o incontrolada) del entorno del sistema en el sistema. Las variables de salida $y(t)$ representan los aspectos observables o medibles de la respuesta del sistema.

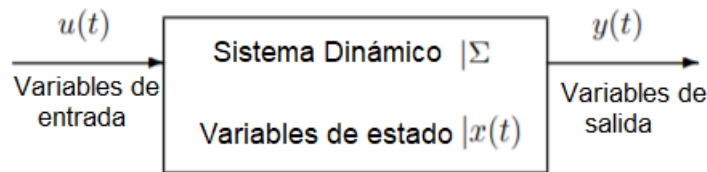


Figura 2. 1: Diagrama esquemático del modelo de sistemas dinámicos.

Fuente:

Elaborado por: Autor.

Sin embargo, esta definición es suficiente para delinear cinco aplicaciones potenciales de un modelo matemático:

1. Análisis: dada una trayectoria futura de $u(t)$, $x(0)$ en el presente, y el modelo del sistema Σ , predice el futuro de $y(t)$. Este caso de uso se denomina comúnmente "simulación" o "predicción".
2. Estimación de estados: dado un sistema Σ con historias de tiempo $u(t)$ y $y(t)$, se debe hallar x que sea consistente con Σ , $u(t)$ y $y(t)$. Este es el problema de la monitorización, es decir, no puede medir todos los estados, pero desea monitorear todos los estados. Desea sintetizar un algoritmo que fusiona el modelo y los estados medibles para producir los estados no medibles.
3. Diseño o planificación del sistema: dado $u(t)$ y algo de $y(t)$ deseado, se debe buscar Σ tal que $u(t)$ actúe sobre Σ lo que producirá a $y(t)$. La mayoría de las disciplinas de la ingeniería se ocupan de la síntesis del diseño. Tradicionalmente, se pueden crear varios prototipos físicos para sintetizar un sistema deseado. Sin embargo, esto puede llevar mucho tiempo y resultar caro.
4. Identificación del modelo: dado las señales $u(t)$ e $y(t)$, que generalmente se obtienen a partir de datos experimentales, se determina un modelo Σ y sus valores de parámetros que sean consistentes con $u(t)$ y $y(t)$. Claramente, un modelo "bueno" es uno que es consistente con una variedad de conjuntos de datos $u(t)$ e $y(t)$. Esto a menudo se denomina "identificación del sistema" en la

literatura de control o simplemente "modelado" en el aprendizaje automático.

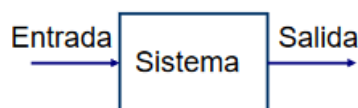
5. Síntesis de control. dado un sistema Σ con el estado actual $x(0)$ y algo de $y(t)$ deseado, se encuentra $u(t)$ tal que Σ produzca $y(t)$. Este es, en pocas palabras, el problema de la gestión del sistema dinámico. La idea es construir una serie de decisiones que produzcan valores deseables a través del sistema.

Usando el modelo del sistema dinámico mostrado en la figura 2.1, ahora se tiene un marco formal para comprender las aplicaciones prácticas que se desarrollarán en el capítulo 3.

2.4.2. Función de transferencia y función de respuesta impulsiva.

La función de transferencia $G(s)$ es una representación conveniente de un sistema dinámico invariante en el tiempo lineal. Matemáticamente, la función de transferencia es una función de variables complejas. Para sistemas de dimensión finita, la función de transferencia es simplemente una función racional de una variable compleja. La función de transferencia se puede obtener mediante inspección o mediante simples manipulaciones algebraicas de las ecuaciones diferenciales que describen los sistemas. Las funciones de transferencia pueden describir sistemas de muy alto orden, incluso sistemas de dimensión infinita gobernados por ecuaciones diferenciales parciales.

La función de transferencia de un sistema se puede determinar a partir de experimentos en un sistema. Una descripción de entrada-salida de un sistema es esencialmente una tabla de todos los posibles pares de entrada-salida. Para sistemas lineales, la tabla puede caracterizarse por un solo par de entradas, por ejemplo, la respuesta al impulso o la respuesta al escalón.



$$\text{Caracterización del sistema} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}}$$

Figura 2. 2: Caracterización del sistema para obtención de función de transferencia.
Fuente: (Ogata, 2010)

La función de transferencia de un sistema de ecuación diferencial lineal, invariante en el tiempo, se define como la relación entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de conducción) bajo el supuesto de que todas las condiciones iniciales son cero. Por ejemplo, se va a considerar un sistema lineal invariante en el tiempo definido por la siguiente ecuación diferencial,

$$a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^n + b_1 x^{n-1} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x$$

$$(n \geq m)$$

donde y es la salida del sistema y x es la entrada. La función de transferencia de este sistema es la relación entre la transformada de Laplace de salida y la transformada de Laplace de entrada cuando todas las condiciones iniciales son cero, o

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}$$

Al utilizar el concepto de función de transferencia, es posible representar la dinámica del sistema mediante ecuaciones algebraicas en s . Si la potencia más alta de s en el denominador de la función de transferencia es igual a n , el sistema se denomina sistema de n -ésimo orden.

La aplicabilidad del concepto de función de transferencia se limita a los sistemas de ecuaciones diferenciales lineales, con invariantes pequeños. Sin embargo, el enfoque de la función de transferencia se utiliza ampliamente en el análisis y diseño de tales sistemas. En lo que sigue, se enumeran comentarios importantes sobre la función de transferencia. (Tenga en cuenta que en la lista un sistema al que se hace referencia es uno descrito por una ecuación diferencial lineal, invariante en el tiempo).

1. La función de transferencia de un sistema es un modelo matemático en el sentido de que es un método operacional de expresar la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.

2. La función de transferencia es una propiedad de un sistema en sí, independiente de la magnitud y naturaleza de la entrada o función de conducción.
3. La función de transferencia incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida; sin embargo, no proporciona ninguna información sobre la estructura física del sistema. (Las funciones de transferencia de muchos sistemas físicamente diferentes pueden ser idénticas).
4. Si se conoce la función de transferencia de un sistema, la salida o respuesta puede estudiarse para varias formas de entradas con miras a comprender la naturaleza del sistema.
5. Si se desconoce la función de transferencia de un sistema, se puede establecer experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida, una función de transferencia proporciona una descripción completa de las características dinámicas del sistema, a diferencia de su descripción física.

2.4.3. Diagramas de bloques de sistemas.

Un sistema de control puede constar de varios componentes. Para mostrar las funciones realizadas por cada componente, en la ingeniería de control, se utiliza comúnmente un diagrama llamado diagrama de bloques. A continuación, se analizan los aspectos introductorios de los sistemas de control automático, incluidas varias acciones de control, luego se presenta un método para obtener diagramas de bloques para sistemas físicos y, finalmente, se discuten técnicas para simplificar dichos diagramas. (Ogata, 2010)

Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones realizadas por cada componente y del flujo de señales. Dicho diagrama describe las interrelaciones que existen entre los diversos componentes. A diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar de manera más realista los flujos de señales del sistema real.

La combinación de diagramas de bloques y funciones de transferencia es una forma poderosa de representar sistemas de control. Las funciones de transferencia que relacionan diferentes señales en el sistema se pueden derivar mediante manipulaciones algebraicas puras de las funciones de transferencia de los bloques utilizando álgebra de diagrama de bloques. Para mostrar cómo se puede hacer esto, se comienza con una combinación simple de sistemas.

Ahora considere un sistema que es una combinación en cascada de sistemas con las funciones de transferencia $G_1(s)$ y $G_2(s)$, tal como se muestra en la figura 2.2 (a). La salida exponencial pura del primer bloque es la señal exponencial $G_1 u$, que también es la entrada al segundo sistema. La salida exponencial pura del segundo sistema es,

$$y = G_2(G_1 u) = G_1 G_2 u$$

Por lo tanto, La función de transferencia del sistema es, por tanto, $G = G_1 G_2$, es decir, el producto de las funciones de transferencia.

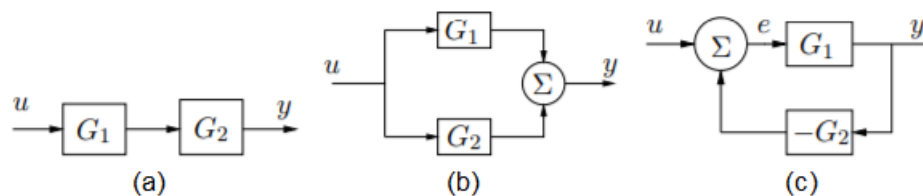


Figura 2. 3: Combinación de sistemas en cascada para conexiones (a) en serie, (b) en paralelo y (c) de retroalimentación de dos sistemas lineales.

Fuente: (Ogata, 2010)

Ahora, se considera una conexión en paralelo de sistemas con las funciones de transferencia $G_1(s)$ y $G_2(s)$, tal como se muestra en la figura 2.3 (b). Sea $u = e^{st}$ la entrada al sistema, la salida exponencial pura del primer sistema es entonces $y_1 = G_1 u$ y la salida del segundo sistema es $y_2 = G_2 u$. La salida exponencial pura de la conexión en paralelo es entonces,

$$y = G_1 u + G_2 u = (G_1 + G_2)u$$

En consecuencia, la función de transferencia de la conexión en paralelo es, por tanto, $G = G_1 + G_2$.

Finalmente, se considera una conexión de retroalimentación de sistemas con las funciones de transferencia G_1 y G_2 , tal como se muestra en la figura 2.3 (c). Sea $r = e^{st}$ la entrada del sistema, "y" la salida exponencial pura, y "e" la parte exponencial pura del error. Escribiendo las relaciones para los diferentes bloques y la unidad de suma, se encuentra que,

$$\begin{aligned}y &= G_1 e \\e &= r - G_2 y \\y &= G_1 (r - G_2 y) \\(1 + G_1 G_2)y &= G_1 r \\y &= \frac{G_1}{1 + G_1 G_2} r\end{aligned}$$

La función de transferencia de la conexión de retroalimentación es,

$$G(s) = \frac{G_1(s)}{G_1(s) + G_2(s)}$$

Aunque, con un poco de práctica, la ecuación que relaciona las señales de interés se puede escribir mediante inspección.

2.4.4. Modelado matemático de sistemas mecánicos.

Los sistemas mecánicos generalmente se modelan como un sistema de parámetros agrupados, de modo que un sistema distribuido como una viga podría considerarse un sistema que consiste en una serie de elementos rígidos de inercia unidos por una combinación de elementos de resorte y amortiguador sin masa. Los elementos de inercia representan la energía cinética almacenada en el sistema; genera la energía potencial y dispersa la energía que se disipa de un sistema mecánico en forma de calor/sonido, etc.

Se disponen de dos tipos de sistemas mecánicos, es decir, que el sistema mecánico puede ser un sistema mecánico lineal o puede ser un tipo de sistema mecánico rotacional. En un tipo de sistemas mecánicos lineales, se utilizan tres variables, que son:

- Fuerza, representada por "F"
- Velocidad, representada por "V"
- Desplazamiento lineal, representado por "X"

Y también, se deben considerar tres parámetros del sistema mecánico lineal que son:

- Masa, representada por "M"
- Coeficiente de fricción viscosa, representado por "b"
- Constante de fuerza del resorte, representada por "k"

Pero en un sistema mecánico rotacional se consideran tres variables, que son:

- Torque, representado por "T"
- Velocidad angular, representada por " ω "
- Desplazamiento angular, representado por " θ "

Y también se deben considerar dos parámetros, que son:

- Momento de inercia, representado por "J"
- Coeficiente de fricción viscosa, representado por "B"

En la figura 2.5 se muestra un sistema mecánico de desplazamiento lineal, donde se consideran las variables (F, v, x) y parámetros (M, b, k)

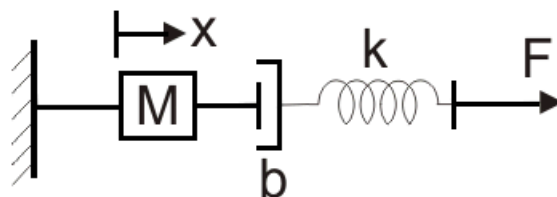


Figura 2. 4: Representación del sistema mecánico de desplazamiento lineal.
Fuente: (Ogata, 2010)

Como se puede observar se encuentra marcadas varias variables en el propio diagrama, por ejemplo, x es el desplazamiento (véase la figura 2.4). Cómo el sistema es mecánico se debe aplicar la segunda ley del movimiento de Newton, por lo tanto, se puede escribir la fuerza como,

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

$$F = M \underbrace{\frac{d^2x}{dt^2}}_{F_1} + b \underbrace{\frac{dx}{dt}}_{F_2} + \underbrace{kx}_{F_3}$$

Posteriormente, se aplica la transformada de Laplace a la ecuación diferencial ordinaria para obtener la función de transferencia.

$$\mathcal{L}[F] = M\mathcal{L}\left[\frac{d^2x}{dt^2}\right] + b\mathcal{L}\left[\frac{dx}{dt}\right] + k\mathcal{L}[x]$$

$$F(s) = Ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s)$$

$$F(s) = (Ms^2 + bs + k)X(s)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + bs + k}$$

Esta ecuación es el modelado matemático para un sistema de control mecánico.

2.4.5. Modelado matemático de sistemas eléctricos.

La dinámica de los sistemas físicos resulta de la transferencia, pérdida y almacenamiento de masa o energía. Una ley básica utilizada para modelar sistemas eléctricos es la conservación de carga, también conocida como Ley de Kirchhoff de Corriente (LKC). Otra ley básica es la conservación de la energía. En los sistemas eléctricos, la conservación de energía se conoce comúnmente como Ley de Kirchhoff de Voltaje (LKV), que establece que la suma algebraica de los voltajes alrededor de un circuito cerrado o bucle debe ser cero.

Estas leyes físicas por sí solas no proporcionan suficiente información para escribir las ecuaciones que describen el sistema. Deben proporcionarse tres tipos más de información; los cuatro requisitos son: (Palm, 2014)

1. Las leyes físicas apropiadas, como la conservación de carga y energía.
2. Descripciones con base empírica, llamadas relaciones constitutivas, para algunos o todos los elementos del sistema.
3. La forma específica en que los elementos del sistema están dispuestos o conectados.
4. Cualquier relación debida a la causalidad integral, como la relación entre carga y corriente,

En un tipo de sistema eléctrico se tienen tres variables, que son:

- Voltaje que está representado por "V".
- Corriente que está representada por "I".

- Cargo que está representado por "Q".

Y también se deben considerar tres parámetros que son componentes activos y pasivos de los circuitos eléctricos:

- Resistencia que está representada por "R".
- Capacitancia que está representada por "C".
- Inductancia que está representada por "L".

Ahora ya se está en condiciones de derivar una analogía entre los tipos de sistemas eléctricos y mecánicos. Hay dos tipos de analogías y se escriben a continuación:

a. Analogía fuerza-voltaje:

Para comprender este tipo de analogía, se considera un circuito que consta de una combinación en serie de resistencia, inductor y condensador. Un voltaje V está conectado en serie con estos elementos como se muestra en el diagrama del circuito de la figura 2.5.

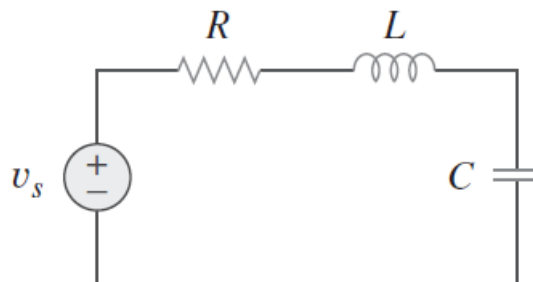


Figura 2. 5: Representación de un circuito RLC en serie.
Fuente: (Alexander et al., 2018; Hayt et al., 2019)

Ahora, a partir del diagrama del circuito y con la ayuda de la ecuación LKV, se escribe la expresión del voltaje en términos de carga, resistencia, condensador e inductor como,

$$v_s = v_R + v_L + v_C$$

$$v_s = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

$$v_s = R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{1}{C} i$$

Ahora, comparando lo anterior con relación a derivado para el sistema mecánico, se encuentra que:

- La masa “M” es análoga a la inductancia “L”.
- La fuerza “F” es análoga al voltaje “V”.
- El desplazamiento “x” es análogo a la carga “Q”.
- El coeficiente de fricción “b” es análogo a la resistencia “R” y
- La constante del resorte “k” es análoga a la inversa del capacitor (C).

Estas analogías se conocen como analogía de tensión de fuerza.

b. Analogía de fuerza-corriente:

Para comprender este tipo de analogía, se considera un circuito que consta de la combinación en paralelo de resistencia, inductor y condensador, tal como se muestra en la figura 2.6.

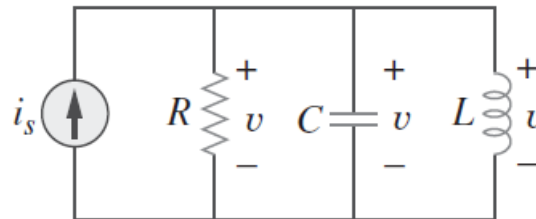


Figura 2. 6: Representación de un circuito RLC en paralelo.
Fuente: (Alexander et al., 2018; Hayt et al., 2019)

Un voltaje v está conectado en paralelo con estos elementos, tal como se muestra en el diagrama del circuito. Ahora, a partir del diagrama del circuito y con la ayuda de la ecuación KCL, escribimos la expresión para la corriente en términos de flujo, resistencia, condensador e inductor como,

$$i_s = i_R + i_L + i_C$$

$$i_s = \frac{v}{R} + \frac{1}{L} \int v dt + C \frac{dv}{dt}$$

$$i_s = \frac{1}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{1}{L} v + C \frac{d^2v}{dt^2}$$

Ahora, comparando lo anterior con lo que hemos derivado para el sistema mecánico, encontramos que,

La masa “M” es análoga al condensador “C”.

La fuerza “F” es análoga a la corriente “I”.

El coeficiente de fricción “b” es análogo a la resistencia “1/R” y

La constante de resorte “k” es análoga a la inversa del inductor “L”.

2.5. Entorno de simulación por diagrama de bloques – Simulink.

Simulink es una extensión gráfica de MATLAB para modelado y simulación de sistemas. En Simulink, los sistemas se dibujan en la pantalla como diagramas de bloques. Se encuentran disponibles muchos elementos de los diagramas de bloques, como funciones de transferencia, uniones sumadoras, etc., así como dispositivos virtuales de entrada y salida como generadores de funciones y osciloscopios. Estos dispositivos virtuales le permitirán realizar simulaciones de los modelos que construirá. Simulink está integrado con MATLAB y los datos se pueden transferir fácilmente entre los programas. En este tutorial, aplicaremos Simulink a los ejemplos de sistemas modelados, luego crearemos controladores y simularemos los sistemas

2.5.1. Simulink para control de procesos.

MatLab, que significa MATrix LABoratory, es un entorno computacional (software) técnico para la visualización y el cálculo numérico de alto rendimiento. Simulink es una parte de MatLab que se puede utilizar para simular sistemas dinámicos. Para facilitar la definición del modelado, Simulink agrega una nueva clase de ventanas llamadas ventanas de diagrama de bloques. En estas ventanas, los modelos se crean y editan principalmente mediante comandos controlados a través del mouse. Parte de dominar Simulink es familiarizarse con la manipulación de componentes del modelo dentro de estas ventanas.

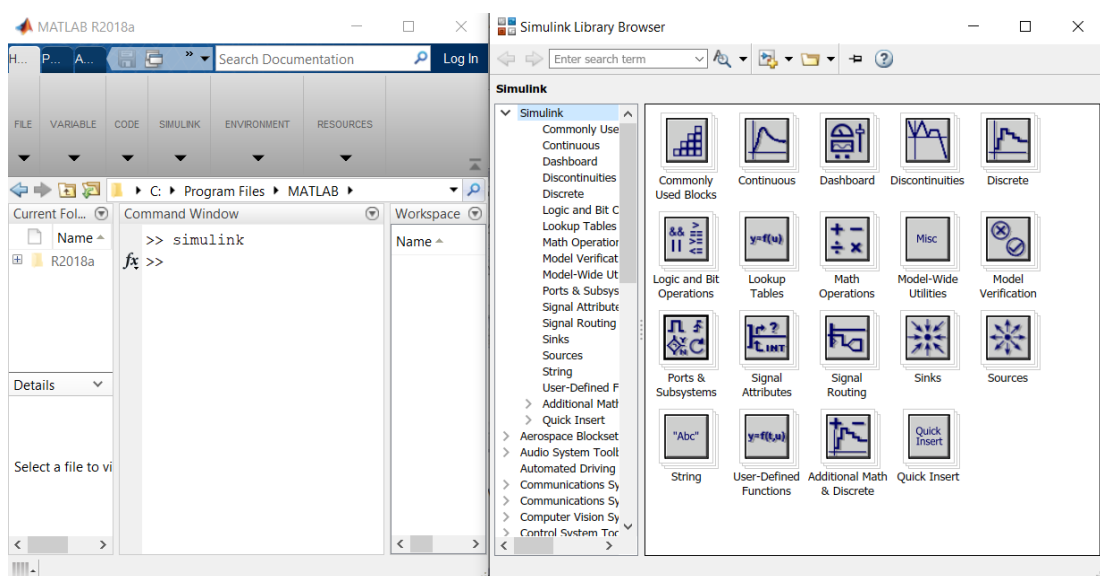


Figura 2. 7: Ventanas del entorno de simulación MatLab y librería de Simulink.

Elaborado por: Autor.

En la figura 2.7 se muestra la ventana de inicio de MatLab y el navegador de librerías de Simulink. Para abrir el entorno de Simulink se debe escribir en el Command Window "Simulink" (ver figura 2.7) lo que permite abrir la ventana tal como se muestra en la figura 2.8.

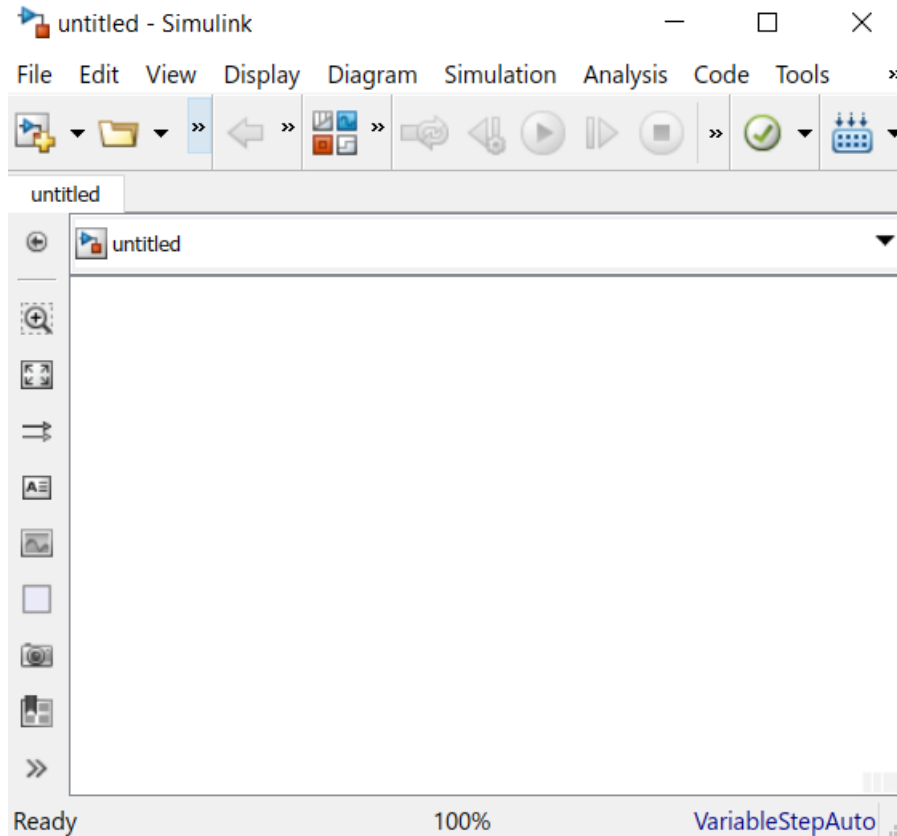


Figura 2. 8: Ventanas del entorno de simulación Simulink.
Elaborado por: Autor.

En el área de trabajo de la figura 2.8 se van a construir los diagramas de bloques necesarios arrastrando y soltando los bloques apropiados de la ventana principal del navegador de librerías de Simulink. A continuación, se especifican algunos de los bloques más utilizados en el modelado de sistemas de dinámicos de control automático: desde el bloque "Continuous" (haga doble clic) se pueden utilizar los bloques típicos para construir sistemas dinámicos (por ejemplo, función de transferencia, retardo de tiempo, entre otros), tal como se muestra en la figura 2.9. En la figura 2.10 se muestran los diagramas de bloques para la librería "Sinks", aquí a menudo se utiliza el bloque "Scope" para el trazado de los resultados que se obtienen al simular un sistema de control. Desde el bloque "Sources" la función "Step" se utiliza para simular cambios de paso en la entrada, tal como se muestra en la figura 2.11.

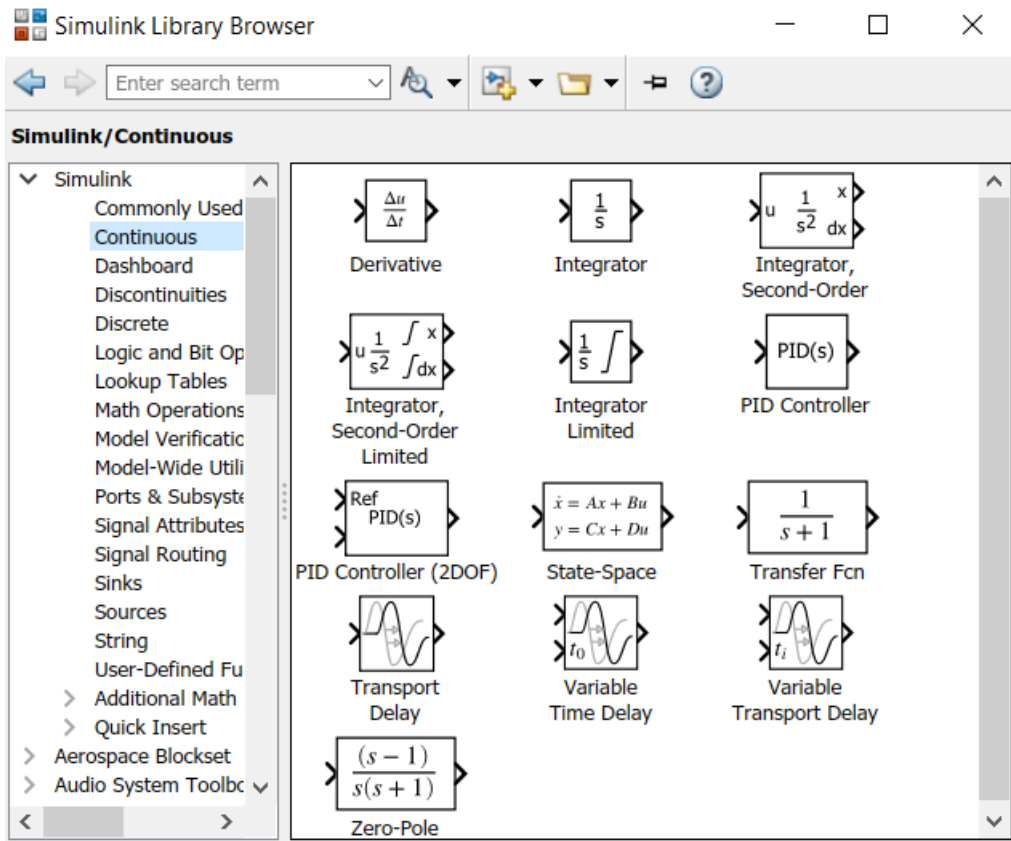


Figura 2. 9: Ventana de la librería “Continuous” en el entorno de Simulink.
Elaborado por: Autor.

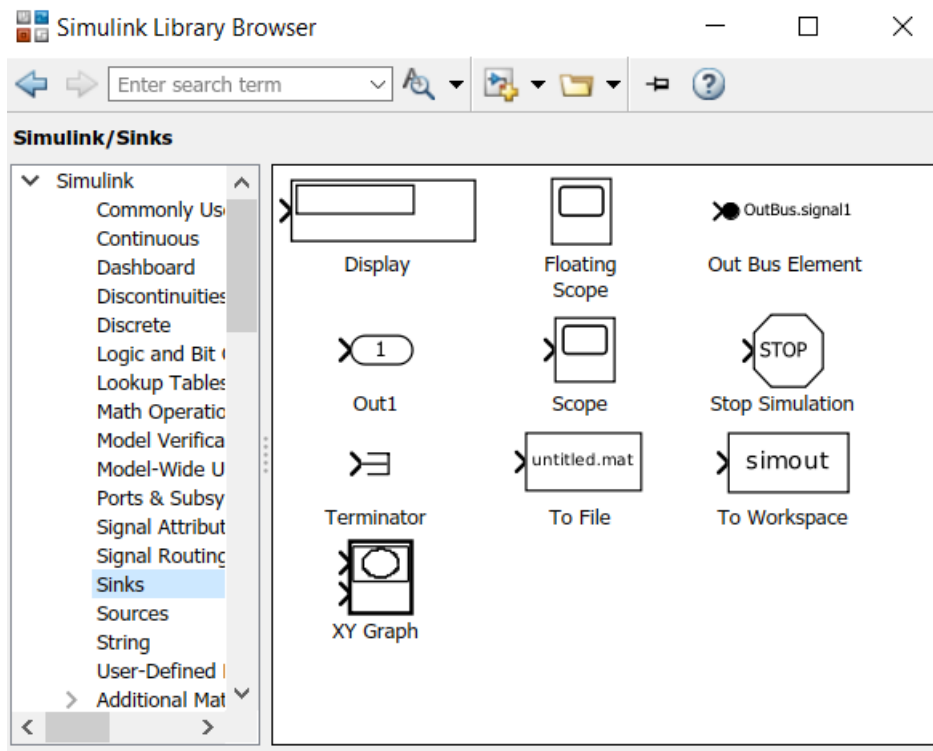


Figura 2. 10: Ventana de la librería “Sinks” en el entorno de Simulink.
Elaborado por: Autor.

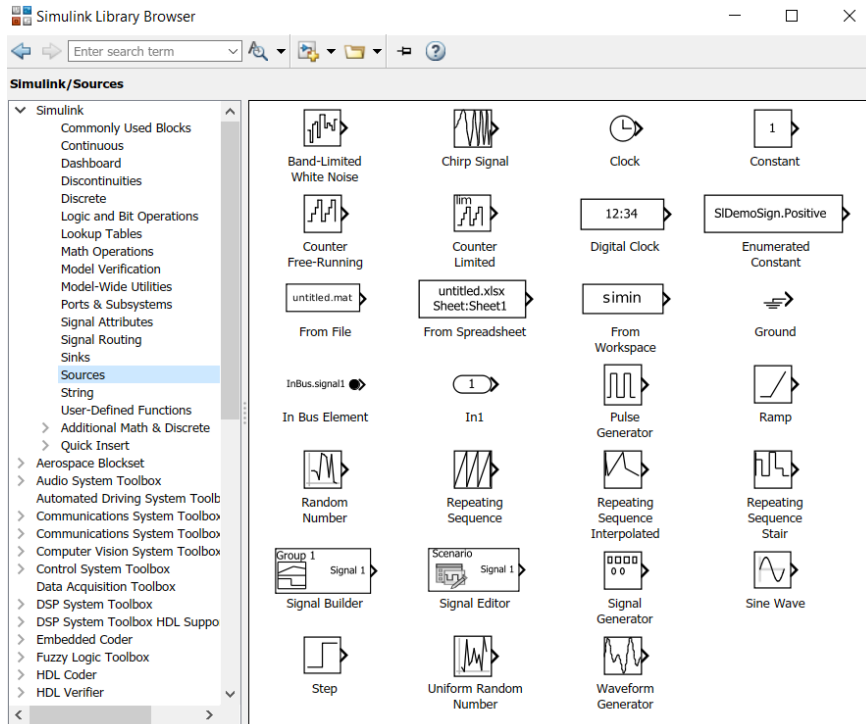


Figura 2. 11: Ventana de la librería “Sources” en el entorno de Simulink.
Elaborado por: Autor.

Del bloque "Signal Routing", se escoge el bloque "Mux" (véase la figura 2.12) que es utilizada a menudo para concatenar señales en un "bus", por ejemplo, para trazar múltiples señales en "Scope".

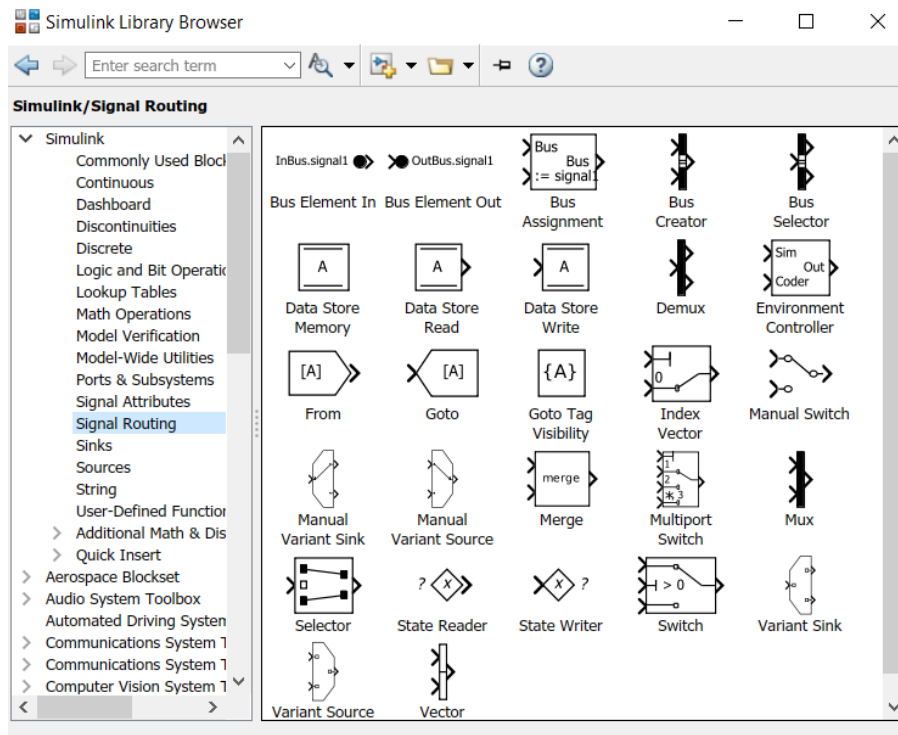


Figura 2. 12: Ventana de la librería “Signal Routing” en el entorno de Simulink.
Elaborado por: Autor.

La figura 2.13 muestra el conjunto de bloques "Math Operations" que proporciona las operaciones matemáticas habituales, en especial se utiliza a menudo en sistemas de control los bloques "Add" y

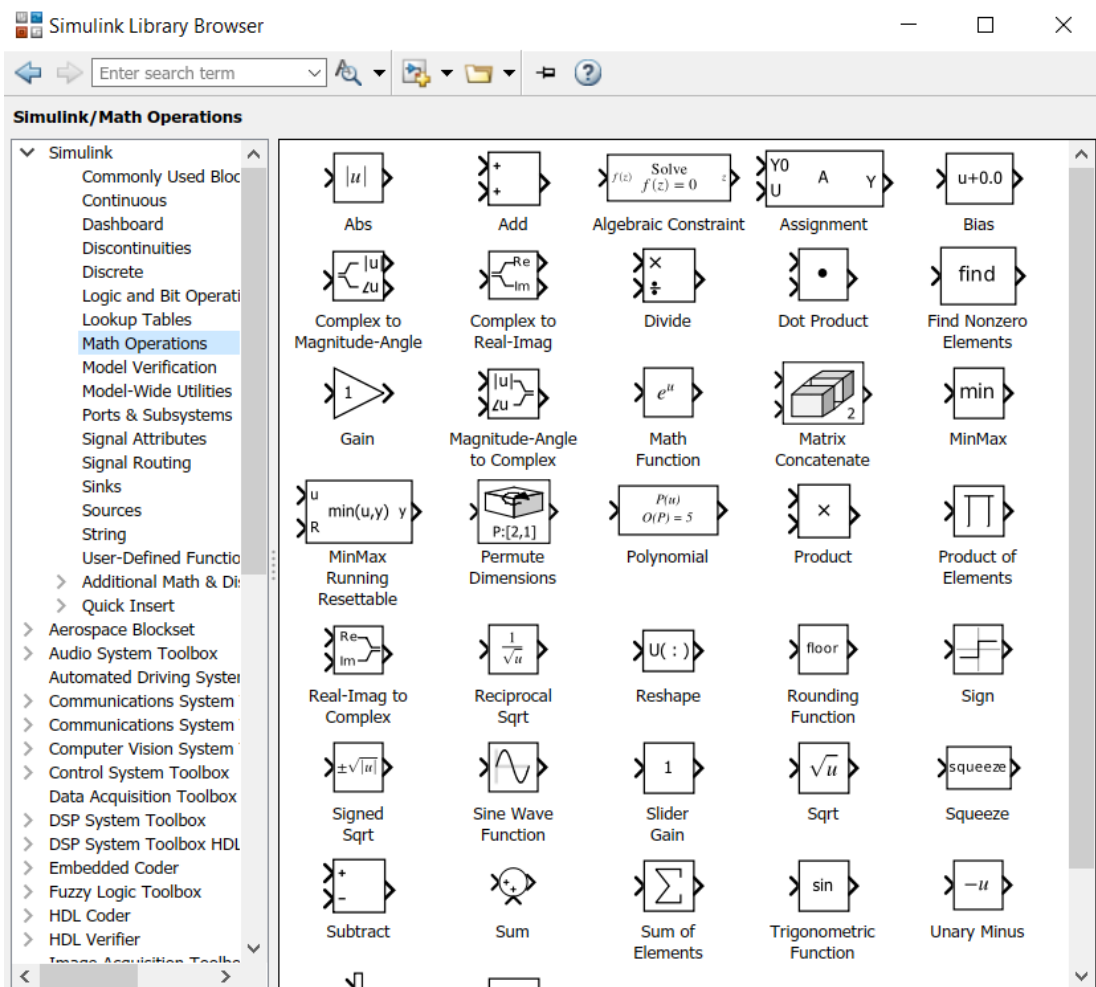


Figura 2. 13: Ventana de la librería "Math Operations" en el entorno de Simulink. Elaborado por: Autor.

2.6. Entorno de simulación en Octave.

El objetivo de esta sección es hacer que los estudiantes comiencen a utilizar Octave. Octave es muy similar al entorno de MatLab, en especial Octave Online que no requiere de uso de licencia del producto para poder operar correctamente. Si se domina MatLab, también Octave resultaría sencillo utilizarlo. (Huamaní N., 2019)

Octave es un sistema de software interactivo de código abierto para cálculos numéricos y gráficos. Está especialmente diseñado para cálculos matriciales: resolución de ecuaciones simultáneas, cálculo de vectores

propios (Eigenvectors) y valores propios (Eigenvalues), etc. En muchos problemas de ingeniería del mundo real, los datos pueden expresarse como matrices y vectores, y reducirse a estas formas de solución. Además, Octave puede mostrar datos en una variedad de formas diferentes, y también tiene su propio lenguaje de programación que permite ampliar el sistema. Se puede considerar como una calculadora gráfica programable y muy poderosa. Octave facilita la resolución de una amplia gama de problemas numéricos, lo que le permite pasar más tiempo experimentando y pensando en el problema más amplio. (Linge & Langtangen, 2016)

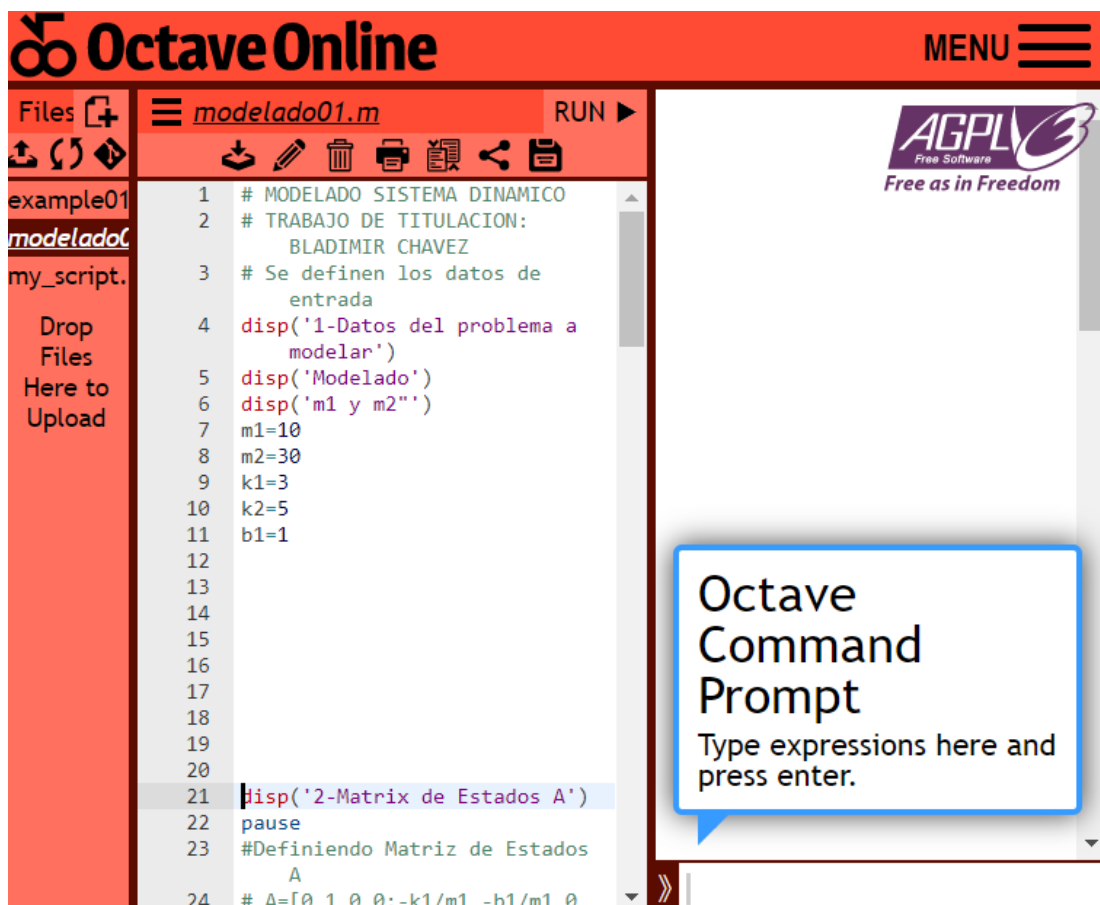


Figura 2. 14: Ventana principal del entorno de simulación Octave Online.
Elaborado por: Autor.

En la figura 2.14 se muestra la ventana principal de Octave Online. Octave se desarrolla y mantiene en sistemas Unix, pero también se puede utilizar en sistemas Mac y Windows. Hay una serie de excelentes paquetes adicionales para Octave disponibles en Internet en Octave Forge. Consecuentemente, Octave y Matlab son lenguajes de alto nivel y entornos de programación matemática para:

- Visualización
- Programación, desarrollo de algoritmos
- Cálculo numérico: álgebra lineal, optimización, control, estadísticas, procesamiento de señales e imágenes, etc.

A continuación, se indica la comparación entre Octave y MatLab,

- Matlab es más flexible/avanzado/potente/costoso,
- Octave es gratis (licencia GPL), y
- Hay pequeñas diferencias en la sintaxis.

Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados

En el presente capítulo se desarrollan las aplicaciones prácticas de sistemas de control mediante el modelado matemático de sistemas dinámicos (mecánicos, eléctricos y de nivel de líquido) utilizando entornos de simulación como MatLab/Simulink y Octave.

3.1. Diseño de experimentación práctica 1: modelamiento matemático utilizando Simulink.

En esta sección se diseñan dos escenarios de simulación de sistemas de control de modelos matemáticos a partir de ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo y otro utilizando la función de transferencia. El **primer escenario**, consiste en diseñar un diagrama de bloques a partir de la siguiente ecuación diferencial,

$$\dot{x}(t) = -2x(t) + u(t)$$

donde $u(t)$ representa a una onda cuadrada con una amplitud de 1 y una frecuencia de 1 rad/s. Para lo cual es necesario utilizar los bloques integrador y de ganancia, tal como se muestra en la figura 3.1. Es decir, que el bloque integrador integra su entrada $\dot{x}(t)$ para producir $x(t)$. Los otros bloques necesarios en este modelo incluyen un bloque de ganancia y un bloque de suma. Para generar una onda cuadrada, se utiliza un bloque generador de señal y seleccionar la forma de onda cuadrada, pero cambiando las unidades predeterminadas a radianes/s. Finalmente, para poder visualizar la salida del sistema se utiliza el diagrama de bloque Scope.

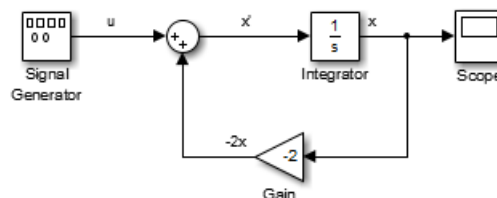


Figura 3. 1: Diagrama de bloques del escenario 1 para la aplicación práctica 1.
Elaborado por: Autor.

Un concepto importante en este modelo es el bucle que incluyen los bloques de suma, integrador y ganancia. En la ecuación diferencial propuesta,

$x(t)$ es la salida del bloque Integrador. También es la entrada a los bloques que calculan $x'(t)$, en la que se basa este sistema. Esta relación se implementa mediante un bucle. La respuesta de salida $x(t)$ se observa en el osciloscopio en cada paso de tiempo. El tiempo de simulación para este sistema se escogió 10 segundos, y la salida del sistema se muestra en la figura 3.2.

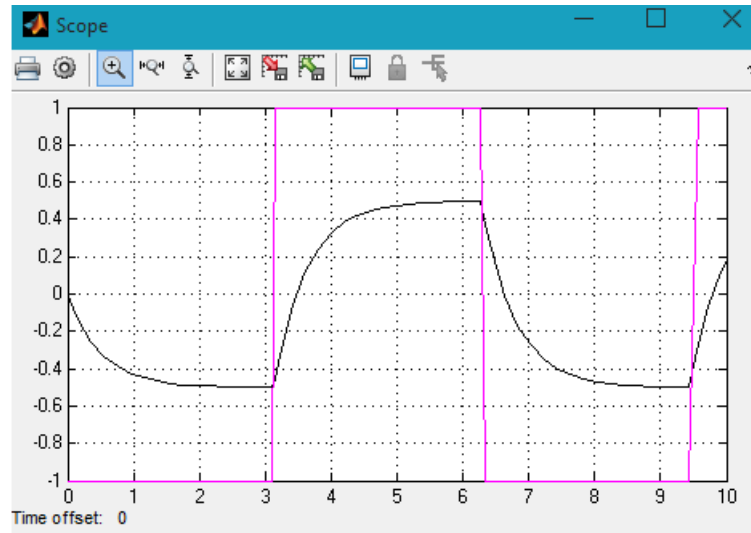


Figura 3. 2: Señal de salida $x(t)$ en el osciloscopio para el escenario 1.
Elaborado por: Autor.

Para el **segundo escenario**, se trabajará con la ecuación del primer escenario, pero esta será modificada mediante la transformada de Laplace y así obtener la función de transferencia. El modelo mostrado en la figura 3.3 utiliza el bloque “Transfer Fcn”, que acepta a $u(t)$ como entrada y $x(t)$ como salida. Entonces, el bloque implementa la función de transferencia $X(s)/U(s)$.

Para obtener la función de transferencia de este segundo escenario, se aplica la Transformada de Laplace a la ecuación del primer escenario, y se obtienen los siguientes cálculos matemáticos,

$$\mathcal{L}[\dot{x}(t)] = -2\mathcal{L}[x(t)] + \mathcal{L}[u(t)]$$

$$sX(s) = -2X(s) + U(s)$$

$$(s + 2)X(s) = U(s)$$

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1}{s + 2}$$

Una vez descrita la ecuación de función de transferencia, se procede a diseñar el sistema de control en Simulink, tal como se muestra en la 3.3. Para

el bloque “Transfer Fcn” se requieren de parámetros para especificar los coeficientes del numerador y del denominador. En este caso, el numerador es 1 y el denominador es $s + 2$. Para esto hay que especificar ambos términos como vectores de coeficientes de potencias sucesivamente decrecientes de s . En este caso, el numerador es [1] (o solo 1) y el denominador es [1 2], tal como se muestra en la figura 3.4.

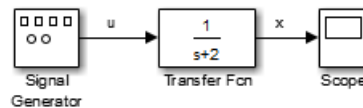


Figura 3. 3: Diagrama de bloques del escenario 2 para la aplicación práctica 1.
Elaborado por: Autor.

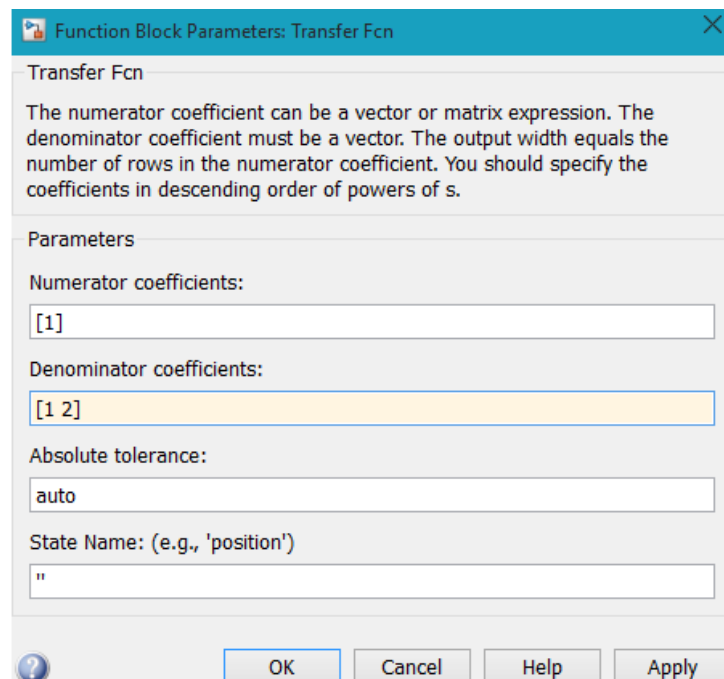


Figura 3. 4: Configuración de parámetros del bloque función de transferencia del escenario 2.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.5 se observa la respuesta de la señal de salida del sistema de control de la figura 3.3, y al compararla con la salida de respuesta del primer escenario de esta sección se observa que las dos respuestas son idénticas, y eso es lo que se esperaba obtener. Estos dos escenarios son simulados de manera diferentes pero sus respuestas en el dominio del tiempo deben ser siempre las mismas.

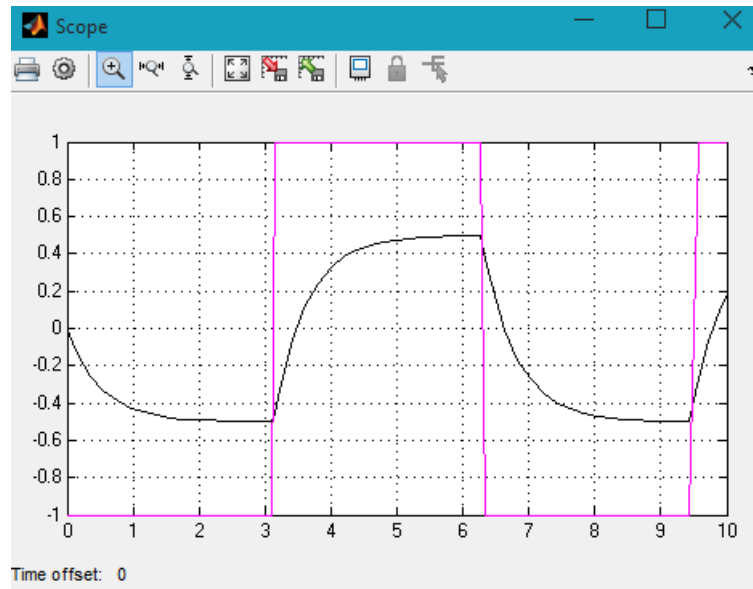


Figura 3. 5: Señal de salida $x(t)$ en el osciloscopio para el escenario 2.
Elaborado por: Autor.

3.2. Diseño de experimentación práctica 2: Tipos de sistemas de primer orden utilizando Simulink.

Antes de realizar los diseños de escenarios a simular de los sistemas de control, se realiza una breve explicación teórica de los sistemas de primer orden. Los sistemas de primer orden son, por definición, sistemas cuya relación entrada-salida es una ecuación diferencial de primer orden, tal como se analizó en la sección 3.1. Una ecuación diferencial de primer orden contiene una derivada de primer orden, pero ninguna derivada superior a la de primer orden; el orden de una ecuación diferencial es el orden de la derivada de mayor orden presente en la ecuación.

Los sistemas de primer orden contienen un solo elemento de almacenamiento de energía. En general, el orden de la ecuación diferencial de entrada y salida será el mismo que el número de elementos de almacenamiento de energía independientes en el sistema. El almacenamiento de energía independiente no se puede combinar con otros elementos de almacenamiento de energía para formar un único elemento de almacenamiento de energía equivalente. Por ejemplo, en el Circuitos Eléctricos I se aprendió que dos capacitores en paralelo se pueden modelar como un solo capacitor equivalente; por lo tanto, una combinación en paralelo de dos capacitores forma un solo elemento de almacenamiento de energía

independiente. Y de manera análoga sucede con dos capacitores combinados en serie.

Generalmente, los sistemas de primer orden son una clase de sistemas extremadamente importante. Muchos sistemas prácticos son de primer orden; por ejemplo, el sistema de amortiguación de masa y el sistema de calentamiento de masa son sistemas de primer orden. Los sistemas de orden superior a menudo se pueden aproximar como sistemas de primer orden con un grado razonable de precisión si tienen un modo de primer orden dominante.

A continuación, se procederá a realizar los diseños de los diferentes escenarios que se implementarán en esta sección. La figura 3.6 muestra el esquemático de un sistema de control automático de primer orden. Se puede observar que el sistema de primer orden tiene solo un polo. La figura 3.6 (a) muestra el diagrama de bloques del sistema de control automático de primer orden, mientras que la figura 3.6 (b) muestra el diagrama de bloques simplificado (equivalente).

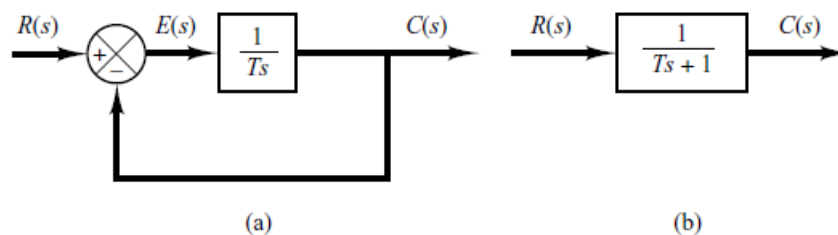


Figura 3. 6: (a) Diagrama de bloques de un sistema de primer orden; (b) Diagrama de bloques simplificado.

Elaborado por: Autor.

Ahora se supone que la función de transferencia (relación salida-entrada) está definida por,

$$\frac{C(s)}{R(s)} = K \frac{1}{Ts + 1}$$

Donde, K es la ganancia de corriente directa (DC) y T es la constante de tiempo del sistema. Esta constante de tiempo es una medida de la rapidez con la que responde un sistema de primer orden a una entrada de paso unitario. Mientras, que para la ganancia DC es la relación del sistema entre la señal de entrada y el valor de estado estable de salida.

A continuación, se va a analizar un sistema de lazo abierto y otro de lazo cerrado para el caso de un sistema de primer orden con retardo y se mostrara el parámetro del sistema de primer orden. Se va a considerar el sistema de primer orden con retraso dado por la siguiente función de transferencia,

$$G(s) = \frac{2}{3s + 1} e^{-s}$$

Donde, $K = 2$ es la ganancia en DC, $T = 3$ es la constante de tiempo, $t_d = 1$, es el tiempo de retardo. Se va a diseñar este sistema de control de bucle abierto en Simulink para la función de transferencia $G(s)$ utilizando los bloques básicos (Transfer Fcn, ganancia, suma y Transport Delay). En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran los sistemas de control de bucle abierto y retroalimentado, para lo cual se asume una entrada de paso unitario (Step).

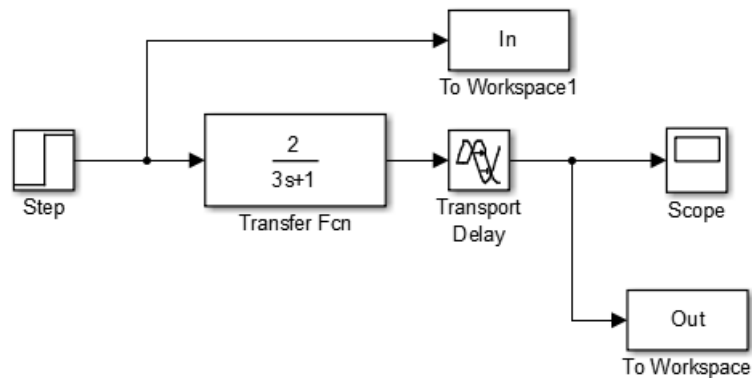


Figura 3. 7: Sistema de control de bucle abierto en Simulink.
Elaborado por: Autor.

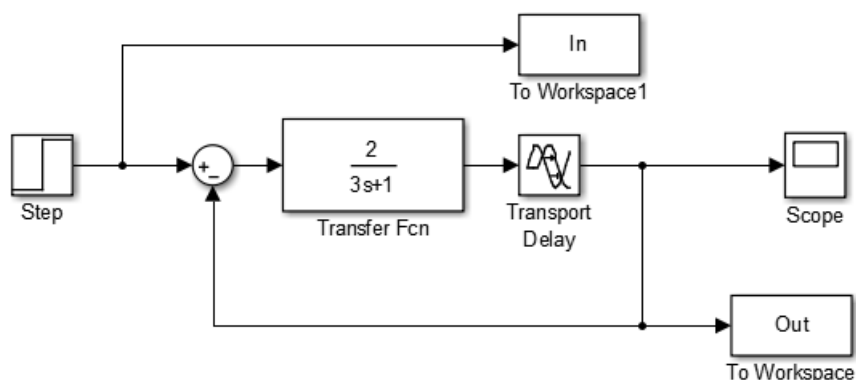


Figura 3. 8: Sistema de control de bucle cerrado en Simulink.
Elaborado por: Autor.

El resultado de la respuesta al escalón y el parámetro se muestran en la figura 3.9. Entonces, si se conocen los datos experimentales para el sistema de primer orden, se puede obtener la función de transferencia determinando

el parámetro (K, T, t_d) cómo se discutió en el ejemplo de identificación del sistema de control.

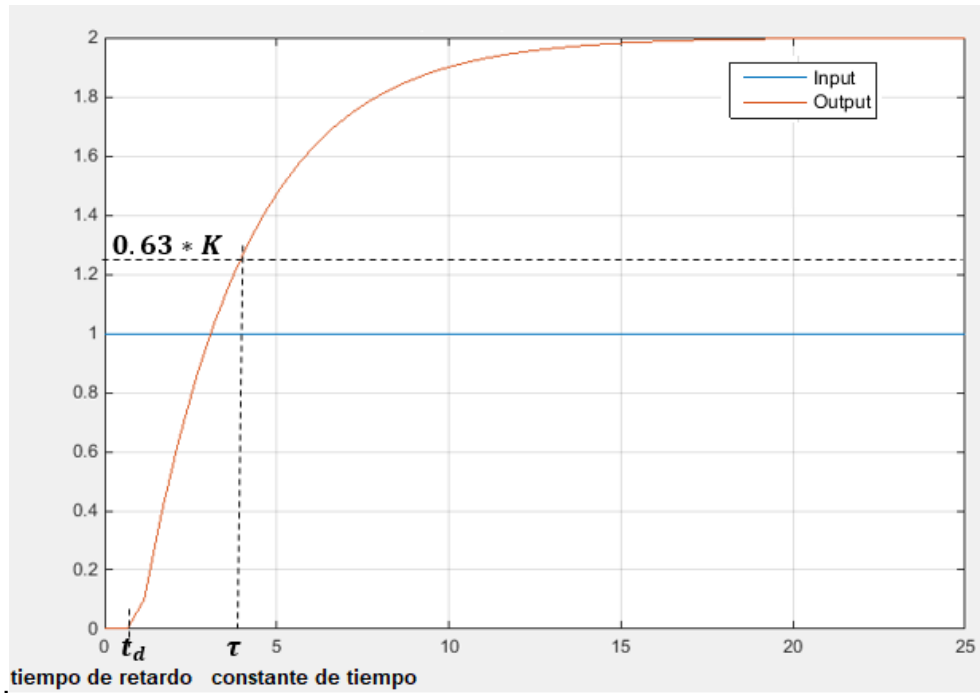


Figura 3. 9: Respuesta al escalón para el sistema de control de bucle abierto.
Elaborado por: Autor.

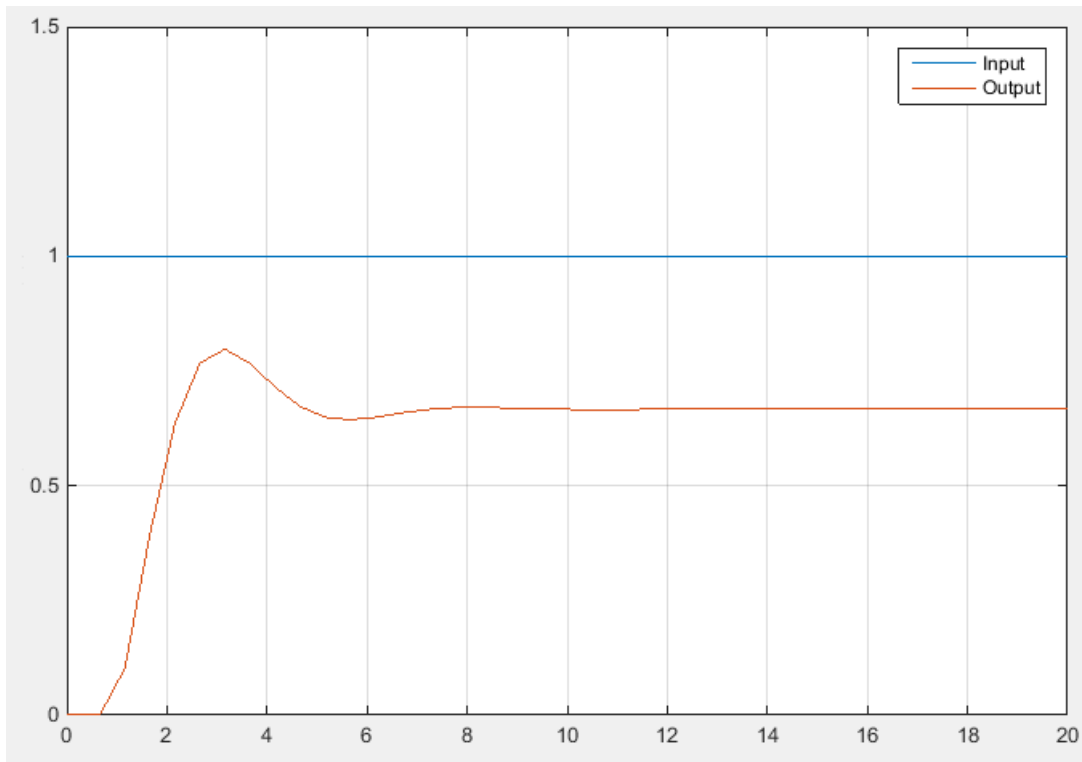


Figura 3. 10: Respuesta al escalón para el sistema de control de bucle cerrado.
Elaborado por: Autor.

Dependiendo de las dos respuestas del sistema, se observa que para determinar la función de transferencia del sistema se debe obtener el parámetro de la característica de lazo abierto porque en este caso se obtiene la respuesta y el comportamiento del sistema sin ningún efecto de modificación o adición.

3.3. Diseño de experimentación práctica 3: Tipos de sistemas de segundo orden utilizando entorno Octave.

En esta sección se describe el modelo matemático del sistema dinámico que se muestra en la figura 3.11. El sistema mecánico está compuesto por, dos bloques de masas m_1 y m_2 , dos constantes de fuerza en el resorte k_1 y k_2 y el coeficiente de viscosidad b . Para plantear el modelo matemático del sistema mecánico se va a aplicar la 2da Ley de Newton (Dinámica). Antes de plantear el modelo matemático del sistema (ver figura 3.11) se debe recordar que,

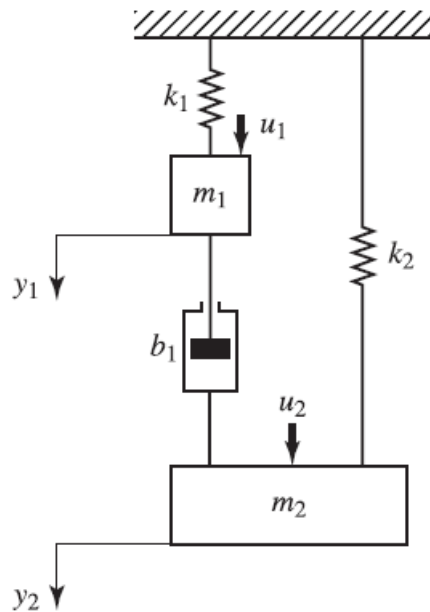


Figura 3. 11: Gráfica del sistema mecánico
Elaborado por: Autor.

- a. La primera y segunda derivada se pueden definir de la siguiente manera y esto permite minimizar el tiempo en la solución de un modelo matemático,

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \ddot{y}$$

b. La sumatoria de fuerzas está definida por:

$$\Sigma F = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d}{dt}(v) = m \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) = m \frac{d^2y}{dt^2} = m\ddot{y}$$

c. La fuerza en el resorte está definida por:

$$F_r = k\Delta y = k(y_i - y_f)$$

d. La fuerza de amortiguamiento o de fricción viscosa está definida por:

$$F_b = bv = b \frac{dy}{dt} = b \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) = b\dot{y} = b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)$$

A continuación, para cada bloque se aplica la 2da Ley de Newton y se plantean como ecuaciones diferenciales según lo indicado en los incisos a, b, c y d.

Para m1:

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m_1 a_1 \\ u_1 + b_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1 y_1 &= m_1 \ddot{y}_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Para m2:

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m_2 a_2 \\ u_2 - b_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_2 y_2 &= m_2 \ddot{y}_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Para poder simular este sistema en el entorno Octave se deben pasar las ecuaciones 1 y 2 en ecuaciones de espacio de estados. Entonces, de acuerdo con la teoría de espacios de estados se asignan las siguientes variables de estado: $x_1 = y_1$, $x_2 = \dot{y}_1$, $x_3 = y_2$ y $x_4 = \dot{y}_2$. Donde x e y representan las ecuaciones de espacio de estados de entrada y salida, respectivamente. Ahora, se expresan las ecuaciones de espacio de estados para la salida y entradas:

a. Para las salidas y_1 e y_2 queda definidas las ecuaciones de espacio de estados:

$$y_1 = x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 \quad (3)$$

$$y_2 = 0x_1 + 0x_2 + x_3 + 0x_4 \quad (4)$$

b. Para las entradas x se definen las ecuaciones de espacio de estados:

➤ Para \dot{x}_1 : se sabe que $x_1 = y_1$ y se deriva quedando,

$$\dot{x}_1 = \dot{y}_1 = x_2 \leftrightarrow \dot{x}_1 = 0x_1 + x_2 + 0x_3 + 0x_4 \quad (5)$$

➤ Para \dot{x}_2 : de la ecuación (1) se va a expresar en términos de la variable \dot{x}_2 sabiendo que $x_1 = y_1$, $x_2 = \dot{y}_1$, $x_3 = y_2$ y $x_4 = \dot{y}_2$ (variables de espacio de estados), pero para obtener \dot{x}_2 se debe derivar x_2 , y queda $\dot{x}_2 = \ddot{y}_1$, y que serán sustituidos en (1),

$$\begin{aligned} u_1 + b_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1 y_1 &= m_1 \ddot{y}_1 \\ m_1 \dot{x}_2 &= b_1(x_4 - x_2) - k_1 x_1 + u_1 \\ \dot{x}_2 &= \frac{b_1}{m_1}(x_4 - x_2) - \frac{k_1}{m_1} x_1 + \frac{1}{m_1} u_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k_1}{m_1} x_1 - \frac{b_1}{m_1} x_2 + 0x_3 + \frac{b_1}{m_1} x_4 + \frac{1}{m_1} u_1 \quad (6) \end{aligned}$$

➤ Para \dot{x}_3 : se sabe que $x_3 = y_2$ y se deriva quedando,

$$\dot{x}_3 = \dot{y}_2 = x_4 \leftrightarrow \dot{x}_3 = 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + x_4 \quad (7)$$

➤ Para \dot{x}_4 : de la ecuación (2) se va a expresar en términos de la variable \dot{x}_4 sabiendo que $x_1 = y_1$, $x_2 = \dot{y}_1$, $x_3 = y_2$ y $x_4 = \dot{y}_2$ (variables de espacio de estados), pero para obtener \dot{x}_4 se debe derivar x_4 , y queda $\dot{x}_4 = \ddot{y}_2$, y que serán sustituidos en (2),

$$\begin{aligned} u_2 - b_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_2 y_2 &= m_2 \ddot{y}_2 \\ m_2 \dot{x}_4 &= -b_1(x_4 - x_2) - k_2 x_3 + u_2 \\ \dot{x}_4 &= -\frac{b_1}{m_2}(x_4 - x_2) - \frac{k_2}{m_2} x_3 + \frac{1}{m_2} u_2 \\ \dot{x}_4 &= 0x_1 + \frac{b_1}{m_2} x_2 - \frac{k_2}{m_2} x_3 - \frac{b_1}{m_2} x_4 + \frac{1}{m_2} u_2 \quad (8) \end{aligned}$$

Finalmente, se va a expresar las matrices de las ecuaciones de espacio de estados definida por la entrada y salida del sistema mecánico,

$$[\dot{x}] = A[x] + B[u]$$

$$[y] = C[x] + D[u]$$

Por lo tanto, la matriz de espacio de estados se forma a partir de las ecuaciones (5) a (8) para la representación de entradas y las ecuaciones (3) y (4), y son definidas así,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & 0 & \frac{b_1}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{b_1}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{b_1}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Posterior a las matrices de espacio de estados se procede a realizar el código de programación del sistema de control mecánico utilizando el entorno Octave Online. En la figura 3.12 se muestra las líneas de programación de los datos que se asignaron a m1, m2, k1, k2 y b1.

```
# MODELADO SISTEMA DINAMICO
# TRABAJO DE TITULACION: BLADIMIR CHAVEZ
# Se definen los datos de entrada
disp('1-Datos del problema a modelar')
disp('Modelado')
disp('m1 y m2')
m1=10
m2=30
k1=3
k2=5
b1=1
```

Figura 3. 12: Código de programación para los datos de entrada de la ecuación 9. Elaborado por: Autor.

Ahora, en la figura 3.13 se muestran las líneas de programación para definir las matrices de estados representada por las ecuaciones 9 y 10. En la figura 3.14 se muestran la generación de las matrices A, B, C y D ejecutadas en Octave Online. Ahora, se muestran las líneas de programación (véase la figura 3.15) para generar el modelo de espacio de estados, función de transferencia y las respuesta temporal y natural del sistema de control dinámico.

```

11 disp('2-Matrix de Estados A')
12 pause
13 #Definiendo Matriz de Estados A
14 # A=[0 1 0 0;-k1/m1 -b1/m1 0 b1/m1; 0 0 0 1; 0 b1/m2 -k2/m2 -b1/m2]
15 A=[0 1 0 0;-k1/m1 -b1/m1 0 b1/m1;0 0 0 1;0 b1/m2 -k2/m2 -b1/m2]
16 disp('3-Matrix de Entrada B')
17 pause
18 #Defino la matriz de entradas B
19 B=[0 0;1/m1 0;0 0;0 1/m2]
20 #Deficiendo la matriz de salida C
21 disp('4-Matrix de Salida C')
22 pause
23 C=[1 0 0 0;0 0 1 0]
24 # definiendo transicion
25 disp('5-Matrix de Transmision Directa D')
26 D=[0 0;0 0]

```

Figura 3. 13: Código de programación para las matrices A, B, C y D dadas en las ecuaciones 9 y 10.
Elaborado por: Autor.

```

2-Matrix de Estados A
press enter to continue> source("modelado01.m")
A =

      0      1.0000      0      0
    -0.3000  -0.1000      0      0.1000
      0      0      0      1.0000
      0      0.0333  -0.1667  -0.0333

3-Matrix de Entrada B
press enter to continue> source("modelado01.m")
B =

      0      0
    0.1000      0
      0      0
      0      0.0333

4-Matrix de Salida C
press enter to continue>
C =

      1      0      0      0
      0      0      1      0

5-Matrix de Transmision Directa D
D =

      0      0
      0      0

```

Figura 3. 14: Generación de las matrices A, B, C y D con valores designados para las ecuaciones 9 y 10.
Elaborado por: Autor.

```

28 # Generando el modelo de Espacio de Estados
29 disp('6-Generando el modelo de Espacio de Estados')
30 SYS=ss(A,B,C,D)
31
32 # Obtener la Funcion de Trqnsferencia
33 disp('7-De Espacio de Estado a Funcion de Transferencia')
34 [num den]=ss2tf(SYS)
35
36 # Obtener H(s) simbólica
37 disp('8-Mostrando la ecuación de la Funcion de Transferencia')
38 HS=tf(num, den)
39 pause
40
41 disp('8-Mostrando la respuesta temporal del sistema')
42 HS=tf(num, den)
43 pause
44
45 disp('9-Mostrando la respuesta natural del sistema')
46 step(SYS);
47 pause

```

Figura 3. 15: Código de programación para la generación de espacio de estados, funciones de transferencia y de respuestas temporal y natural.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.16 y 3.17 se muestran los resultados obtenidos del espacio de estados y función de transferencia ejecutados en Octave.

6-Generando el modelo de Espacio de Estados

SYS.a =

	x1	x2	x3	x4
x1	0	1	0	0
x2	-0.3	-0.1	0	0.1
x3	0	0	0	1
x4	0	0.03333	-0.1667	-0.03333

SYS.b =

	u1	u2
x1	0	0
x2	0.1	0
x3	0	0
x4	0	0.03333

SYS.c =

	x1	x2	x3	x4
y1	1	0	0	0
y2	0	0	1	0

SYS.d =

	u1	u2
y1	0	0
y2	0	0

Figura 3. 16: Generación de modelo de espacio de estados.

Elaborado por: Autor.

8-Mostrando la ecuación de la Funcion de Transferencia

Transfer function 'HS' from input 'u1' to output ...

$$y1: \frac{0.1 s^2 + 0.003333 s + 0.01667}{s^4 + 0.1333 s^3 + 0.4667 s^2 + 0.02667 s + 0.05}$$

$$y2: \frac{0.003333 s - 4.214e-23}{s^4 + 0.1333 s^3 + 0.4667 s^2 + 0.02667 s + 0.05}$$

Transfer function 'HS' from input 'u2' to output ...

$$y1: \frac{0.003333 s + 5.912e-20}{s^4 + 0.1333 s^3 + 0.4667 s^2 + 0.02667 s + 0.05}$$

$$y2: \frac{0.03333 s^2 + 0.003333 s + 0.01}{s^4 + 0.1333 s^3 + 0.4667 s^2 + 0.02667 s + 0.05}$$

Figura 3. 17: Generación de ecuaciones de la función de transferencia.
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.8 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los 9 pasos que se especificaron en el código de programación en Octave.

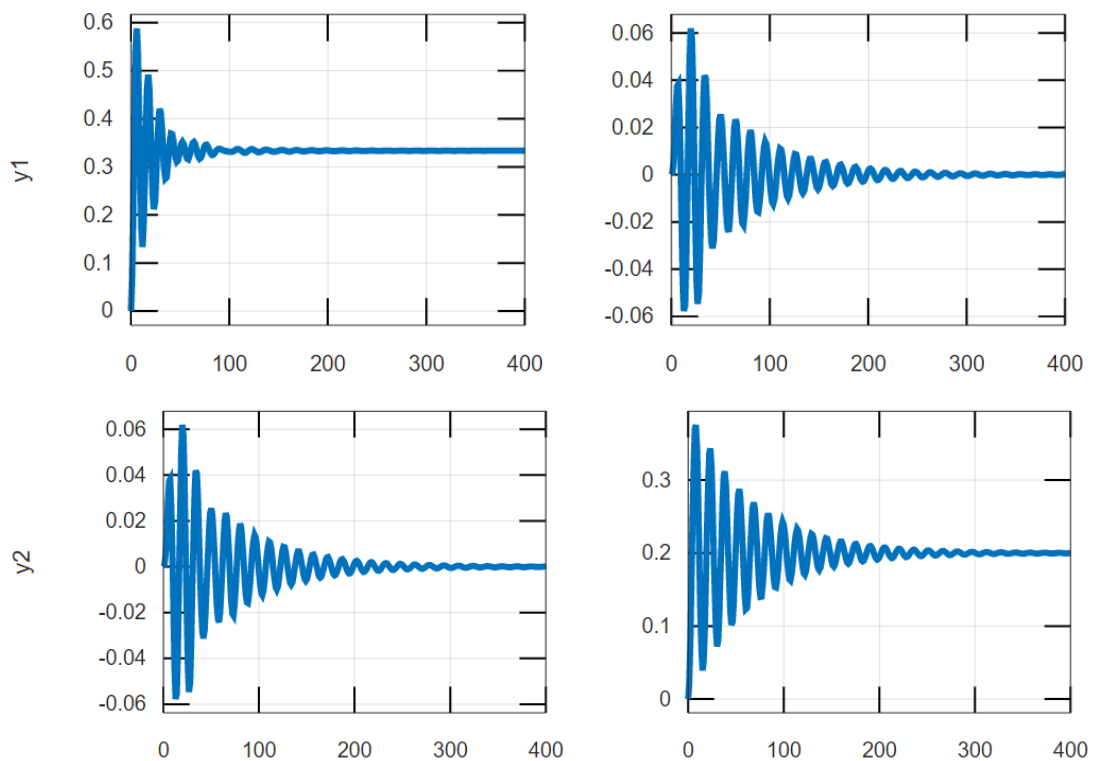


Figura 3. 18: Resultados obtenidos de la simulación del sistema mecánico.
Elaborado por: Autor.

3.4. Diseño de experimentación práctica 4: Tipos de sistemas de segundo orden utilizando entorno Simulink.

En esta sección se presenta el modelo matemático de un circuito eléctrico RLC cuya solución es una ecuación diferencial de segundo orden. En la figura 3.19 se muestra el circuito esquemático en el régimen del tiempo, pero se va a modelar matemáticamente en el régimen de la frecuencia s y cuyo circuito equivalente es el mostrado por la figura 3.20.

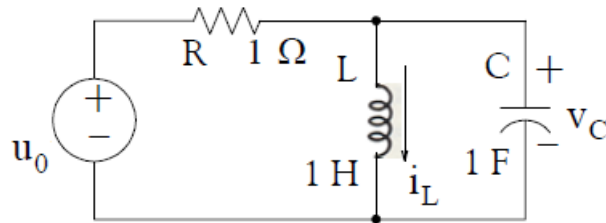


Figura 3. 19: Circuito esquemático del circuito RLC.
Elaborado por: Autor.

Del circuito de la figura 3.20 se va a obtener la función de transferencia (relación de salida/entrada).

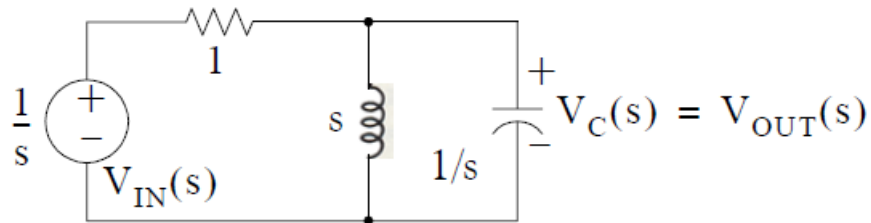


Figura 3. 20: Circuito equivalente del circuito RLC.
Elaborado por: Autor.

Para calcular el voltaje en el capacitor se debe saber que está en paralelo con la inductancia, por lo tanto, primero se calcula la resistencia en paralelo entre L y C , y luego se utiliza la expresión de divisor de voltaje para la obtención de la función de transferencia,

$$R_P = \frac{s \left(\frac{1}{s} \right)}{s + \frac{1}{s}} = \frac{1}{\frac{s^2+1}{s}} = \frac{s}{s^2 + 1}$$

$$V_C(s) = V_{IN}(s) \left(\frac{R_P}{R_P + 1} \right)$$

$$V_C(s) = V_{IN}(s) \left(\frac{\frac{s}{s^2+1}}{\frac{s}{s^2+1} + 1} \right) = V_{IN}(s) \left(\frac{\frac{s}{s^2+1}}{\frac{s+s^2+1}{s^2+1}} \right)$$

$$V_C(s) = V_{IN}(s) \left(\frac{s}{s^2 + s + 1} \right)$$

Por lo tanto, la función de transferencia queda definida como,

$$\frac{V_C(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{s}{s^2 + s + 1} \quad (11)$$

Una vez definida la función de transferencia, se va a proceder con el diseño del sistema de control del circuito utilizando el entorno de simulación Simulink. De acuerdo con lo explicado en la sección 2.5.1 se llama a Simulink desde el entorno MatLab, y se abre un nuevo archivo haciendo clic en el icono “Blank Model” tal como se muestra en la figura 3.21.

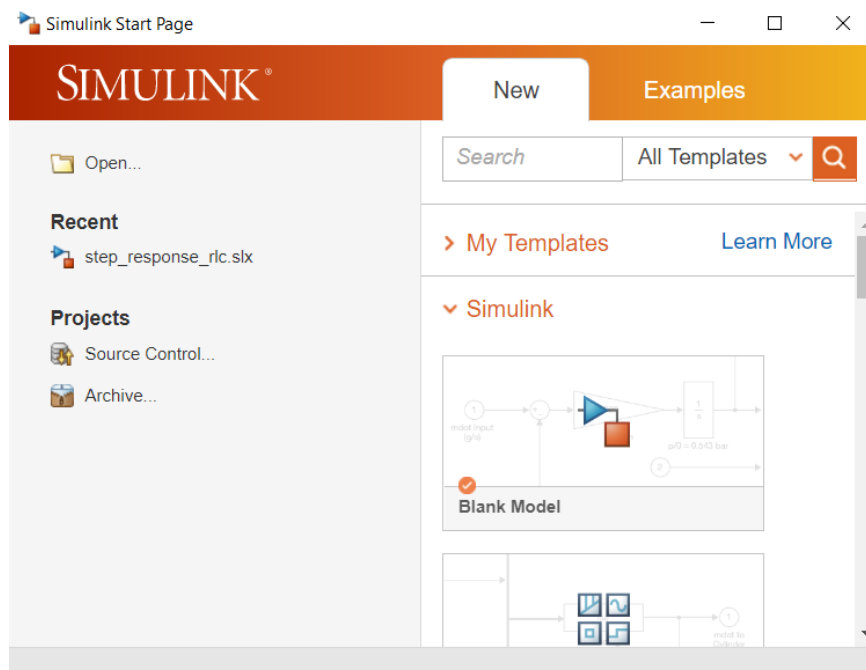


Figura 3. 21: Ventana de inicio de Simulink para creación de un nuevo modelo por bloques.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.22 se muestran los bloques que son necesarios para la implementación del sistema de control para el circuito de la figura 3.16. Se van a utilizar tres bloques para la simulación, que son:

- Bloque “Transfer Fcn” (Función de transferencia, FDT) se encuentra ubicado en “Continuous”,
- Bloque “Scope” se encuentra ubicado en “Sinks”, y
- Bloque “Step” se encuentra ubicado en “Sources”

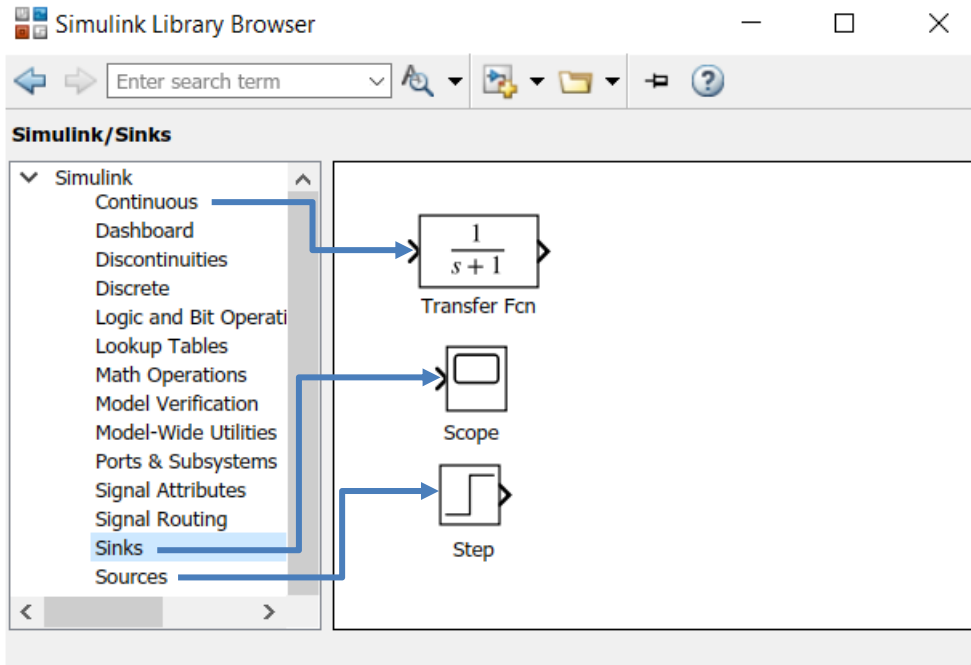


Figura 3. 22: Ventana de la librería de bloques de Simulink para implementación de la FDT.

Elaborado por: Autor.

Ahora, en la figura 3.23 se muestra el diseño del sistema de control utilizando la función de transferencia (ecuación 11).

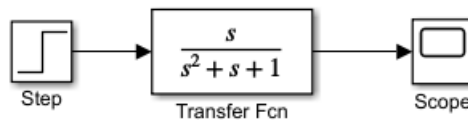


Figura 3. 23: Implementación del sistema de control mediante función de transferencia.

Elaborado por: Autor.

En las figuras 3.24 y 3.25 se muestran las configuraciones de los parámetros para los bloques “Step” y “Transfer Fcn”, respectivamente. Se sabe que el bloque “Step” es una función de paso unitario, pero no está definida con los parámetros apropiados (por defecto $t=0$). En la figura 3.24 se configuran los parámetros de la función de paso unitario. Mientras que en la figura 3.25 se configuran los parámetros de la función de transferencia, por ejemplo, en el numerador se debe colocar [1 0] para que aparezca el término “s” y en el denominador se debe colocar [1 1 1] para que aparezca el polinomio $s^2 + s + 1$.

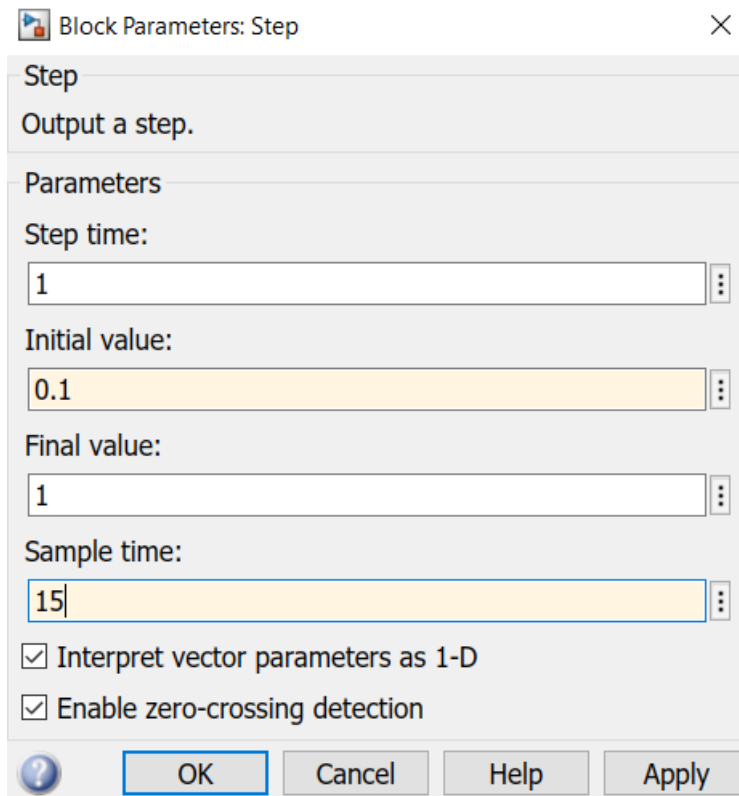


Figura 3. 24: Configuración de parámetros del bloque de función de paso unitario.
Elaborado por: Autor.

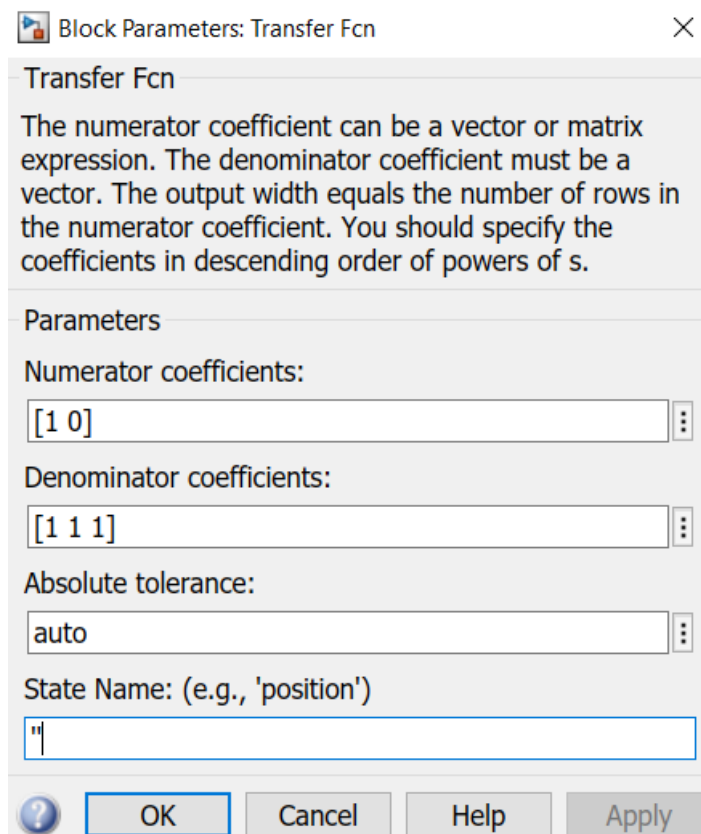


Figura 3. 25: Configuración de parámetros del bloque de función de transferencia.
Elaborado por: Autor.

Una vez realizada las configuraciones mostradas en las figuras 3.24 y 3.25 se procede ahora a configurar el tiempo de parada ($t=15$ s) de la simulación para el sistema de control (ver figura 3.23). La figura 3.26 muestra el resultado obtenido de la simulación del circuito RLC mediante análisis de frecuencia usando la función de transferencia que relaciona el voltaje de salida con el de entrada.

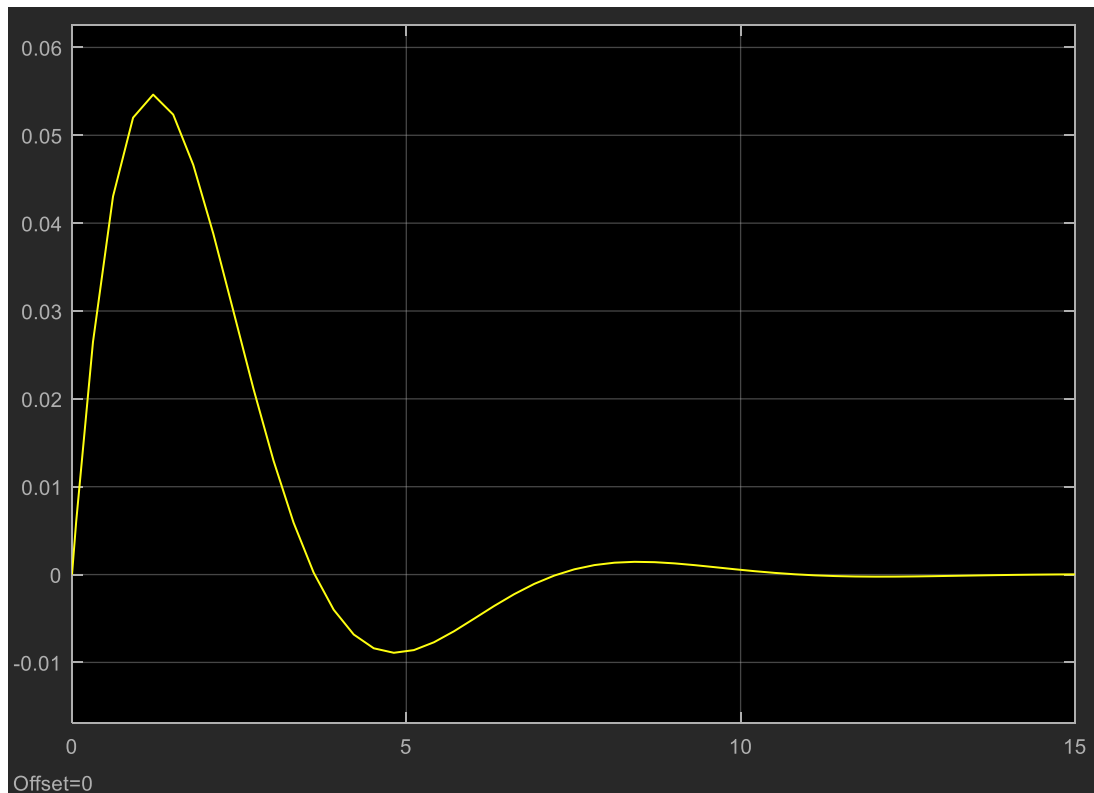


Figura 3. 26: Resultado obtenido de la implementación del sistema de control mediante función de transferencia.

Elaborado por: Autor.

Sería interesante comparar la forma de onda de la figura 3.22 con la que se obtiene utilizando el entorno de MatLab usando el comando plot. La salida del circuito RLC (ver figura 3.19) está definida como $V_{out}(t) = V_c(t)$. La señal de entrada es la función escalón unitario " $u_o(t)$ " cuya transformada de Laplace es $1/s$. Por tanto, en el dominio de frecuencia compleja,

$$G(s) = \frac{V_C(s)}{V_{IN}(s)}$$

$$V_C(s) = G(s)V_{IN}(s) = \frac{s}{s^2 + s + 1} \cdot \frac{1}{s}$$

$$V_C(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}$$

$$\mathcal{L}^{-1}[V_C(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2 + s + 1}\right]$$

$$\mathcal{L}^{-1}[V_C(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{\left(s^2 + s + \frac{1}{4}\right) + 1 - \frac{1}{4}}\right]$$

$$\mathcal{L}^{-1}[V_C(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{\left(s + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}}\right]$$

Para resolver la transformada inversa de Laplace se debe considerar el teorema de traslación, en la que se convierte en un factor exponencial en una traslación en la variable s , definida así,

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s - a)] = e^{-at} \mathcal{L}^{-1}[F(s)]$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{\left(s + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}}\right] = e^{-\frac{1}{2}t} \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2 + \frac{3}{4}}\right]$$

Por lo tanto, la respuesta a la transformada inversa de Laplace es:

$$v_c(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\frac{1}{2}t} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) = \frac{2}{3} \sqrt{3} e^{-\frac{1}{2}t} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right)$$

En la figura 3.27 se muestra el script (código de programación) para calcular la transformada inversa de Laplace (ilaplace) y también mediante “plot” se obtiene la señal de respuesta de salida (voltaje del capacitor) para el circuito RLC. En la figura 3.28 se muestra la señal de respuesta y que al compararla con la señal obtenida en la figura 3.26 son idénticas en todo el tiempo. Con esto se comprueba que el sistema de control implementado está correctamente diseñado mediante el modelado matemático planteado al inicio de esta sección.

```

RLCresponse.m x +
1 - syms s
2 - fd=ilaplace(1/(s^2+s+1));
3 - td=2./3.*3.^(1./2).*exp(-1./2.*t).*sin(1./2.*3.^(1./2).*t);
4 - plot(t,td); grid
5 - xlabel('Tiempo (s)')
6 - ylabel('Voltaje (V)')
7 - title('Respuesta RLC en MatLab')

```

Figura 3. 27: Script de MatLab para análisis del tiempo del circuito RLC.

Elaborado por: Autor.

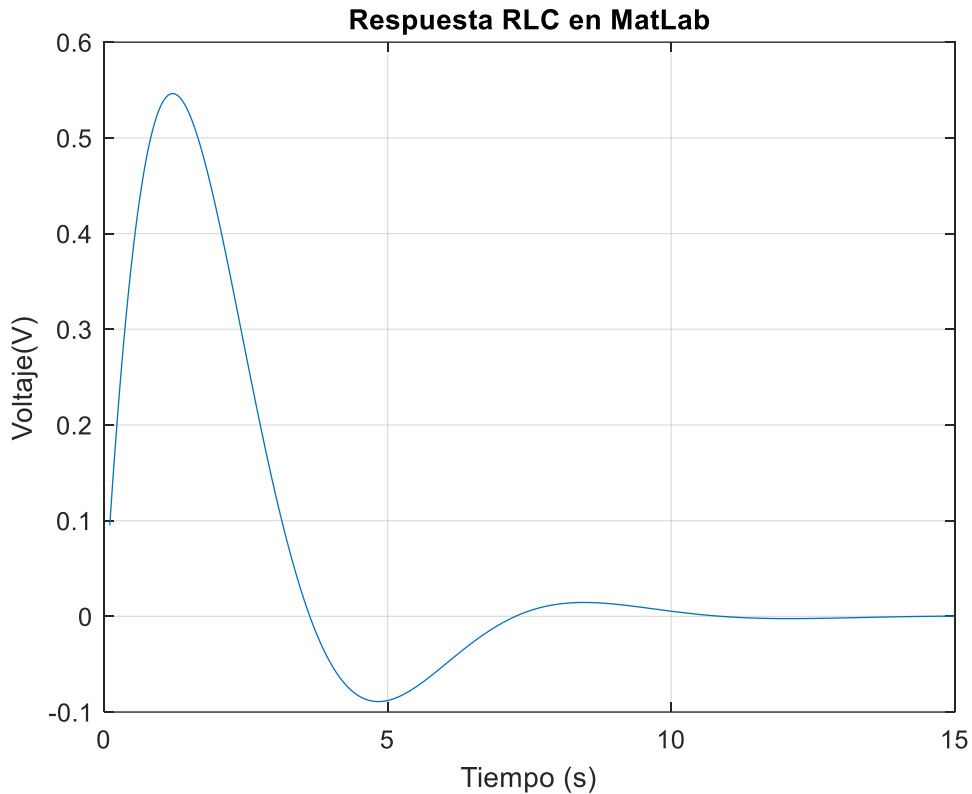


Figura 3. 28: Señal de respuesta de salida para $v_c(t)$.
Elaborado por: Autor.

Después, de haber realizado la simulación mediante función de transferencia en Simulink y comprobar su resultado con el código script en MatLab, se procede ahora a comprobar mediante la aplicación de ecuaciones de espacio de estados. De la figura 3.19 ($R=1 \Omega$, $L=1 \text{ H}$ y $C=1 \text{ F}$) se va a aplicar la ley de Kirchhoff de corriente (LVC) para obtener la siguiente ecuación,

$$\frac{u_0 - v_C}{1} = i_L + i_C \quad (12)$$

Para el análisis del sistema de control mediante ecuaciones de espacio de estado se asignan las siguientes variables de estado x_1 y x_2 para la corriente del inductor y voltaje del capacitor, respectivamente y queda definida así,

$$x_1 = i_L \quad y \quad x_2 = v_C$$

Si se deriva x_1 se verifica que es igual a x_2 , como se demuestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x_1 &= \frac{d}{dt}i_L \quad \therefore \quad \dot{x}_1 = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{L}\int v_C dt\right) \\ \dot{x}_1 &= \frac{1}{L}v_C = v_C \\ \dot{x}_1 &= x_2 = v_C \\ \dot{x}_1 &= 0x_1 + x_2 \quad (13) \end{aligned}$$

Después, se deriva x_2 y queda definida así,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x_2 &= \frac{d}{dt}v_C = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{C}\int i_C dt\right) \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}i_C = i_C \end{aligned}$$

De la ecuación 12 se sustituyen los datos de las variables de estado asignada a x_1, x_2 y \dot{x}_2

$$\begin{aligned} u_0 - x_2 &= x_1 + \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_1 - x_2 + u_0 \quad (14) \end{aligned}$$

Finalmente, se va a calcular las matrices de las ecuaciones de espacio de estados (tratada en la sección 3.3) para diseñar el sistema de control del circuito mostrado por la figura 3.19.

$$[\dot{x}] = A[x] + B[u]$$

$$[y] = C[x] + D[u]$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u \quad (16)$$

En la figura 3.29 se diseña el sistema de control para el circuito de la figura 3.19 utilizando el bloque "State-Space" (espacio de estados). En la figura 3.30 se muestra la configuración del bloque "State-Space".

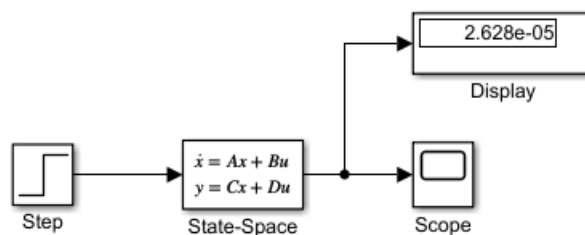


Figura 3. 29: Sistema de control para simulación mediante espacio de estados.

Elaborado por: Autor.

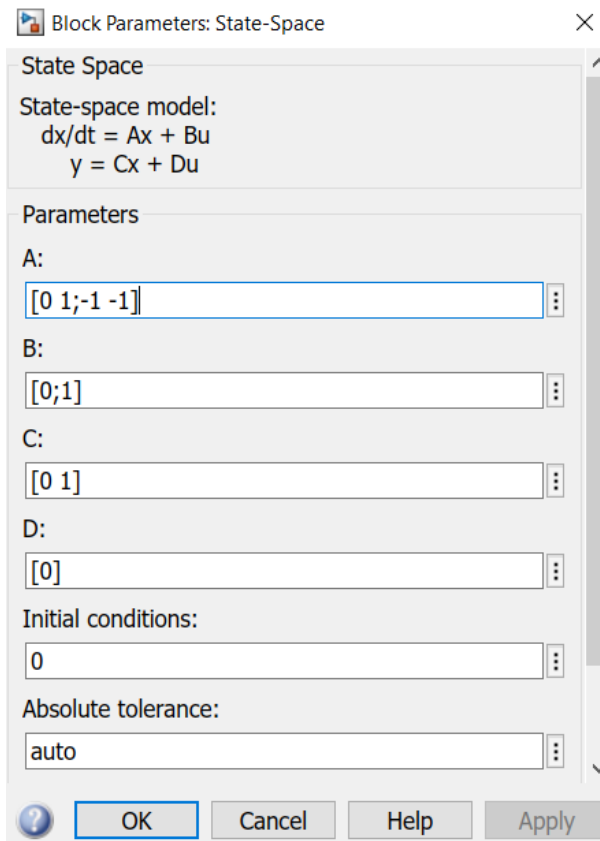


Figura 3. 30: Configuración de parámetros del bloque de espacio de estados.
Elaborado por: Autor.

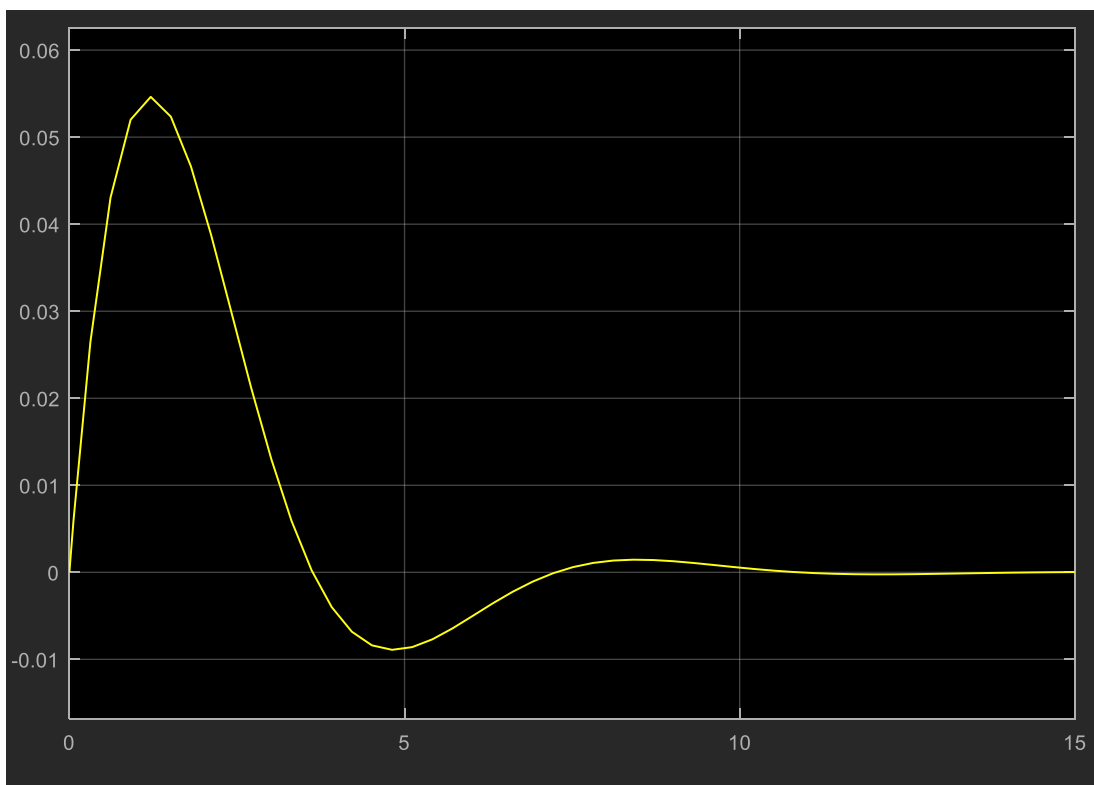


Figura 3. 31: Señal de salida del sistema de ecuaciones de estados para V_c .
Elaborado por: Autor.

Los datos ingresados en la configuración de parámetros de espacio de estados (véase la figura 3.30) son los de las matrices de las ecuaciones 15 y 16. Mientras que la figura 3.31 muestra el resultado obtenido de la simulación diseñada (véase la figura 3.29) y que coinciden con las señales mostradas por las figuras 3.26 y 3.28. Esto indica que el modelado matemático mediante diferentes métodos arrojó los mismos resultados.

Conclusiones.

- Este trabajo de titulación demostró el uso de MatLab/Simulink y Octave Online para la solución de varios problemas que surgen en los sistemas de control con y sin retroalimentación. Estos problemas incluían el cálculo de las respuestas del sistema, las propiedades del sistema (por ejemplo, polos), la construcción de modelos de simulación y el manejo de figuras. Por supuesto, este documento proporciona solo una descripción general rápida de las capacidades de la herramienta. Debe entenderse que la experiencia solo se puede lograr mediante el uso continuo y las aplicaciones frecuentes del comando "ayuda".
- Como último comentario, la intención de este documento es proporcionar una introducción al modelado matemático de sistemas dinámicos utilizando los entornos de simulación MatLab/Simulink y Octave Online y servir como formato para prácticas de laboratorio virtual.

Recomendaciones.

- Incentivar a los estudiantes de la carrera de Electricidad al empleo de herramientas de simulación para aplicaciones de sistemas de control en procesos dinámicos utilizando modelos matemáticos en los que no se requiere mayor inversión.
- Desarrollar aplicaciones prácticas de los controladores PID y de lógica difusa para sistemas no lineales mediante el entorno de simulación Octave Online ya que es un software de código abierto.

Bibliografía

- Alexander, C. K., Sadiku, M. N. O., Cordero Pedraza, C. R., & López Caudana, E. O. (2018). *Fundamentos de circuitos eléctricos*.
- Badr, M. F. (2017). Modeling and Simulation of the Analogous Mechanical and Electrical Systems. *International Journal of Science and Research*, 6(5), 1931–1934.
- Baykov, A., & Gordeev, B. (2016). Mathematical model of electromechanical system with variable dissipativity. *Vibroengineering Procedia*, 8(1), 392–396.
- Bhondge, N. M., Sarode, M. V., & Chaudhari, A. D. (2015). Mathematical Modeling of Mechanical and Electrical System using Differential Equations. *International Journal of Artificial Intelligence and Mechatronics*, 4(3), 100–102.
- Bolton, W. (2015). *Mechatronics: A multidisciplinary approach* (Sixth edition). Pearson.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2008). *Modern control systems* (11th ed). Pearson/Prentice Hall.
- Hayt, W. H., Kemmerly, J. E., Phillips, J. D., & Durbin, S. M. (2019). *Análisis de circuitos en ingeniería*.
- Huamaní N., P. F. (2019). Representation of Series and Transforms in engineering subject, using a Web User Interface for GNU Octave. *Proceedings of the International Congress on Educational and Technology in Sciences 2019*, 2555, 169–178.
- Linge, S., & Langtangen, H. P. (2016). *Programming for Computations—MATLAB/Octave* (Vol. 14). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32452-4>

Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed). Prentice-Hall.

Palm, W. J. (2014). *System dynamics* (Third edition). McGraw-Hill Science.

Patil, A., & More, S. (2014). Mathematical Modeling of Physical System. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 9(3), 57–64.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Chávez Mora, Washington Bladimir** con C.C: # 0941349375 autor del Trabajo de Titulación: **Desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo** 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, 18 de septiembre del 2020

f. _____

Nombre: Chávez Mora, Washington Bladimir

C.C: 0941349375



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo		
AUTOR(ES)	Chávez Mora, Washington Bladimir		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Bastidas Cabrera, Tomas Gaspar		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería Eléctrico Mecánica		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Eléctrico Mecánico		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	18 de septiembre del 2020	No. DE PÁGINAS:	73
ÁREAS TEMÁTICAS:	CONTROLES ELÉCTRICOS, CONTROL Y AUTOMATISMO		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	SISTEMAS, CONTROL, ESTADOS, MODELADO, SIMULACIÓN, PARÁMETROS		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>Este documento del trabajo de titulación para obtener el grado académico de Ingeniero Eléctrico-Mecánico presenta el desarrollo de aplicaciones prácticas de sistemas dinámicos en MatLab/Simulink y Octave para la asignatura de control y automatismo. Para cumplir con el propósito del desarrollo de sistemas de control en Simulink, se tuvo que revisar la parte teórica del modelado matemático de sistemas dinámicos, en especial los mecánicos (2da Ley de Newton, fuerzas en el resorte y amortiguadas) y eléctricos (análisis de circuitos eléctricos en el dominio del tiempo y frecuencia), de ecuaciones diferenciales y la transformada de Laplace, así como también de los entornos de simulación apropiados para modelar los sistemas de control tratados en el capítulo 3, que son MatLab/Simulink y Octave. La mayoría de los problemas en esta asignación se pueden manejar directamente con un comando o función de MatLab/Simulink y Octave apropiado. Para los problemas que requieren el cálculo de una respuesta escalonada de lineal invariante en el tiempo (LTI), se pueden obtener soluciones analíticas utilizando transformadas de Laplace. Estas dos herramientas fueron utilizadas para el desarrollo de las cuatro aplicaciones prácticas que servirán para la formación de futuros ingenieros en electricidad en la materia de control y automatismo.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593994612599	E-mail: washington10mora@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-67608298		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			