

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño, modelado y ejecución de un experimento virtual de
simulación híbrida de una estructura de ingeniería”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Peñafiel Labanda James Alexander

Freire Jimenez Walter Ernesto

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año 2021

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi mamá por su amor y apoyo incondicional, a mi papá por ser mi ejemplo a seguir y siempre estar ahí para aconsejarme y a mis abuelos que desde el cielo ven como cumplo mis metas.

Walter Freire

Le dedico este trabajo, con mucho amor y cariño, a mis padres ya que sin su apoyo no hubiera sido posible este logro

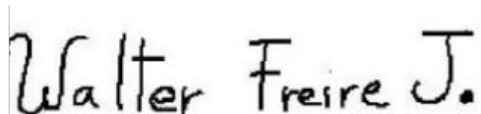
James Peñafiel

AGRADECIMIENTO

En primer lugar nos gustaría empezar agradeciendo a Dios por darnos la vida. Segundo, a nuestros padres por su apoyo incondicional y la fortaleza que nos brindaron durante toda nuestra carrera universitaria. A nuestros profesores y la ESPOL que nos formaron con una excelencia académica y una ética intachable, en especial a nuestro tutor el Dr. Christian Silva, quien fue un pilar fundamental no solo aportando con su conocimiento sino que nos brindó apoyo desinteresado en cada etapa del proyecto y nos permitió alcanzar nuestros objetivos. Y por último, a nuestras familias y amigos que nos acompañaron en este largo pero interesante camino...

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; James Alexander Peñafiel Labanda y Walter Ernesto Freire Jimenez damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Walter Ernesto Freire Jimenez



James Alexander Peñafiel Labanda

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**FRANCIS RODERICH
LOAYZA PAREDES**

Christian Silva

**CHRISTIAN
EDUARDO SILVA
SALAZAR**
2021.09.24
10:13:17 -05'00'

Ph.D. Francis Loayza
PROFESOR DE LA MATERIA

Ph.D. Christian Silva
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las simulaciones híbridas son de gran utilidad en el área de ingeniería ya que combinan efectivamente dos metodologías diferentes de análisis de estructuras: las simulaciones computacionales y los ensayos experimentales. En general, las fallas en estructuras son fenómenos locales y, en muchas ocasiones, complejas de analizar numéricamente. Por esta razón, se implementa una simulación híbrida, en donde solo la parte compleja de análisis se la somete a ensayos experimentales y el resto de la estructura se lo analiza numéricamente. En este trabajo se implementa una herramienta de simulación híbrida virtual para analizar una estructura de ingeniería que está sometida bajo cargas sísmicas. El proceso de realización consta con el modelado en elementos finitos de una estructura de acero de 3 pisos, la partición de la subestructura en numérica y experimental, el modelado de un actuador y, principalmente, el diseño de un controlador y un compensador para eliminar los errores que existe en la interfase entre la subestructura experimental y la numérica: el error por rastreo de posición y el error por retraso de tiempo. Para realizar los experimentos virtuales se utilizó la herramienta de MATLAB, simulink. Se implementó dos tipos de controladores, un controlador PID y un LQR, además de un compensador. Los resultados muestran que un controlador LQR, con un RMS del 20%, es más efectivo para implementar en una simulación híbrida y así obtener resultados más aproximados a la dinámica de la estructura.

Palabras Clave: simulaciones híbridas, simulaciones híbridas en tiempo real, control estructural, LQR, PID

ABSTRACT

Hybrid simulations are very useful in the engineering area since they effectively combine two different methodologies of structure analysis: computational simulations and experimental tests. In general, structural failures are local phenomena and, in many cases, complex to analyze numerically. For this reason, a hybrid simulation is implemented, where only the complex part of the analysis is subjected to experimental tests and the rest of the structure is analyzed numerically. In this work, a virtual hybrid simulation tool is implemented to analyze an engineering structure that is subjected to seismic loads. The realization process consists of the finite element modeling of a three-story steel frame, the partition of the substructure into numerical and experimental, the modeling of an actuator and, mainly, the design of a controller and a compensator to eliminate the errors that exist in the interface between the experimental and numerical substructure: the position tracking error and the time delay error. To carry out the virtual experiments, the MATLAB tool, simulink, was used. Two types of controllers were implemented, a PID controller and an LQR, in addition to a compensator. The results show that an LQR controller, with an RMS of 20%, is more effective to implement in a hybrid simulation and thus obtain results that are closer to the dynamics of the structure.

Key Words: *Hybrid simulation, LQR, PID, numerical and experimental substructure*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
SIMBOLOGÍA	V
ABREVIATURAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del Problema.....	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Simulación híbrida.....	4
1.4.2 Subestructura numérica.....	6
1.4.3 Subestructura experimental	8
1.4.4 Actuador.....	8
1.4.5 Controlador y compensador	8
1.4.6 Sensor de posición	8
1.4.7 Sensor de fuerza	8
1.4.8 Identificación de sistema.....	9
1.4.9 Identificación off-line	9
1.4.10 Identificación On-line	9
CAPÍTULO 2.....	10
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Software computacionales	10
2.2 Cargas sísmicas	12
2.3 Subestructura numérica.....	13
2.4 Actuador.....	14
2.5 Alternativas de diseño para el controlador.....	16
2.6 Controlador.....	18
2.7 Sensores	21
2.7.1 Sensor de posición	21

2.7.2	Sensor de fuerza	21
2.8	Tiempo de retraso y compensación	22
2.9	Compensador de adelanto de fase	23
2.10	Criterio de evaluación	24
CAPÍTULO 3.....		26
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
3.1	Análisis del sistema de control sin controlar	26
3.2	Análisis del sistema de control del actuador	28
3.3	Análisis del sistema de control con el controlador PID	32
3.4	Análisis del controlador PID y compensador de adelanto de fase	35
3.5	Análisis del sistema de control con el controlador LQG	36
3.6	Análisis del controlador LQR y compensador de adelanto de fase	38
3.7	Análisis de costos	41
3.8	Análisis de resultados	43
CAPÍTULO 4.....		46
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
4.1	Conclusiones.....	46
4.2	Recomendaciones.....	46
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

SIMBOLOGÍA

X	Desplazamiento	m
\dot{X}	Velocidad	m/s
\ddot{X}	Aceleración	m/s ²
M_r	Matriz de masa de la estructura de referencia	kg
C_r	Matriz de amortiguamiento de la estructura de referencia	N · s/m
K_r	Matriz de rigidez de la estructura de referencia	N/m
M_e	Matriz de masa de la subestructura experimental	kg
C_e	Matriz de amortiguamiento de la subestructura experimental	N · s/m
K_e	Matriz de rigidez de la subestructura experimental	N/m
M_e	Matriz de masa de la subestructura numérica	kg
C_e	Matriz de amortiguamiento de la subestructura numérica	N · s/m
K_e	Matriz de rigidez de la subestructura numérica	N/m
f_e	Vector de retroalimentación de fuerza	N
A_{ns}	Matriz de estados de la subestructura numérica	—
B_{ns}	Matriz de entrada de la subestructura numérica	N
C_{ns}	Matriz de salida de la subestructura numérica	mm
D_{ns}	Matriz de retroalimentación de la subestructura numérica	—
z_n	Vector de estados de la subestructura experimental	—
u_n	Vector de entrada de la subestructura experimental	N
y_n	Vector de salida de la subestructura experimental	mm
K_p	Contante proporcional del controlador PID	—
K_i	Contante integral del controlador PID	—
K_d	Contante diferencial del controlador PID	—
G_{sv}	Función de transferencia de la servo-válvula	—
G_{da}	Función de transferencia de la dinámica del actuador	—
G_{sn}	Función de transferencia de la subestructura numérica	—
G_{dic}	Función de transferencia de interacción control estructura	—
β_0	Parámetro de la Servo-válvula	m · Pa/s
β_1	Parámetro de la Servo-válvula	1/s
a_1	Parámetro del Actuador	1/s
a_2	Parámetro del Actuador	m Pa
m_e	Parámetro de la subestructura	kg
c_e	Parámetro de la subestructura	N/m
k_e	Parámetro de la subestructura	kg/s

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del litoral
RMS	Raíz cuadrada media normalizada
P	Proporcional
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
LQR	Linear–quadratic regulator (Regulador cuadrático lineal)
RMS	Root mean square (Media cuadrática)
SH	Simulación Híbrida
RTHS	Real time hibrid simulation (Simulación híbrida en tiempo real)
vRTHS	Virtual real time hibrid simulation (Simulación híbrida virtual en tiempo real)
SIT	System Identification Tool

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Relación entre realismo de la respuesta dinámica y el costo (Mera Muñoz, 2021)	5
1.2	Descripción de un sistema con entradas, perturbaciones y salidas	9
2.1	Interfase gráfica de MATLAB	10
2.2	Interfase gráfica de Simulink	11
2.3	Interfase gráfica de Control System Design Toolbox	12
2.4	Interfase gráfica de System Identification Toolbox	12
2.5	Modelo de la estructura de ingeniería (Silva, Gomez, Maghareh, Dyke, y Spencer Jr, 2020)	13
2.6	Proceso de identificación de un sistema	15
2.7	Oscilación sostenida para obtención de PID en método Ziegler-Nichols	17
2.8	Diagrama de bloques del sensor de posición (Silva y cols., 2020)	21
2.9	Diagrama de bloques del sensor de fuerza (Silva y cols., 2020)	22
2.10	Compensación de adelanto de fase en el diagrama de fase (Nise, 2020)	22
2.11	Margen de ganancia y fase (Nise, 2020)	23
2.12	Diagrama de fase del compensador de adelanto	24
3.1	Porcentaje de ajuste de la función de transferencia identificada del actuador	26
3.2	Análisis en el dominio de la frecuencia	27
3.3	Diagrama de bloques del actuador con estructura experimental	28
3.4	Respuesta del actuador ante una una señal de barrido sinusoidal (chirp)	30
3.5	Respuesta del actuador ante terremoto Morgan	30
3.6	Respuesta del actuador ante terremoto El Centro	31
3.7	Respuesta del actuador ante terremoto Kobe	31
3.8	Distribución del controlador PI	32
3.9	Seguimiento del actuador con controlador PID: terremoto El Centro	34
3.10	Seguimiento del actuador con controlador PID: terremoto Kobe	34
3.11	Seguimiento del actuador con controlador PID: terremoto Morgan	35
3.12	Diagrama de bloques del compensador	35
3.13	Comparación de las respuestas de la planta y los controladores en lazo cerrado	36
3.14	Espacio de estados de la planta de control	37
3.15	Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: terremoto El Centro	38
3.16	Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: terremoto Kobe	39
3.17	Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: terremoto Morgan	39
3.18	Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: señal chirp	40
3.19	Comparación de las respuestas de la planta y el controlador LQR en lazo cerrado	40

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Características de Software	10
2.2	Cargas sísmicas	13
2.3	Señal de estudio	13
2.4	Características del actuador servo-hidráulico lineal	14
2.5	Características de datos recolectados	14
2.6	Matriz de decisión	16
2.7	Sintonización de controladores con método Ziegler-Nichol	18
2.8	Valores paramétricos de la planta de control	21
3.1	Valores paramétricos de la planta de control	29
3.2	Parámetros del controlador por método de sintonización de método de Ziegler-Nichols	32
3.3	Resultados de la planta del controlador por método de sintonización de método de Ziegler-Nichols	33
3.4	Parámetros finales del controlador PI	33
3.5	Parámetro de raíz cuadrada media normalizada (RMS) para planta controlada con PI	33
3.6	Parámetros finales del compensador de adelanto de fase	35
3.7	Parámetro de raíz cuadrada media normalizada (RMS) para planta controlada con LQR	37
3.8	Parámetros finales del compensador de adelanto de fase	38
3.9	Parámetro de raíz cuadrada media normalizada (RMS) para planta controlada con LQR	41
3.10	Costos de equipos e instrumentos	42
3.11	Costo de mano de obra ingenieril	42
3.12	Costos de mantenimiento y funcionamiento del proyecto	42
3.13	Comparación de resultados con los diferentes controladores	43

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del Problema

Las simulaciones computacionales son de gran ayuda en el área de diseño de ingeniería, pero estas muchas veces consideran como despreciables ciertas complejidades con el fin de simplificar los problemas lo cual repercute en el resultado final dando respuestas aproximadas. Por otro lado, los ensayos experimentales no tienen estas limitaciones de proceso, pero tienen un costo elevado ya que requieren de un prototipo físico para el desarrollo del experimento, y, además, de la necesidad de un espacio adecuado para los equipos y el prototipo. Adicionalmente, no es posible ensayar físicamente muchas estructuras de ingeniería debido a su tamaño y al costo que implicaría. Una alternativa a los ensayos experimentales y a las simulaciones computacionales constituyen las simulaciones híbridas, que combinan las principales características de las simulaciones computacionales y mediciones físicas con el fin de obtener resultados más exactos, principalmente, en situaciones donde se tiene dinámicas complejas de modelar. Además, ofrecen una alternativa de costo más asequible para el usuario comparadas con los experimentos.

Este problema de ingeniería abarca varios aspectos importantes a analizar:

Económicos: Debido a su carácter físico computacional, el experimento no requiere de equipos tan grandes y costosos, ya que la mayor parte de la estructura va a ser simulada por medio de un modelo matemático computacional, al contrario de un ensayo netamente experimental, lo cual se ve reflejado en todos los costos asociados a producción y ejecución del experimento, además de que la parte de simulación numérica, va a ser realizada a través de un programa de software libre, el cual no tiene costo de licenciamiento. Más aún, los costos de mantenimiento asociados son bajos ya que el mayor porcentaje de equipamiento es computacional.

Técnicos: Una simulación híbrida combina las mejores características de la experimentación física y la simulación numérica, además de que potencia las limitaciones de la otra: en el caso de la simulación computacional que tiene limitaciones asociadas a las complejidades de el sistema a ser modelado debido a las dinámicas desconocidas o inciertas de un sistema, y de la

experimentación física, que tiene limitaciones de espacio y presupuesto. Estas limitaciones son tan significativas en una simulación híbrida ya que el diseñador decide cómo dividir las dos subestructuras para una experimentación óptima que ofrezca mejores resultados de estructuras más complejas.

Seguridad y bienestar: El fin de utilizar un método de modelado o simulación es determinar la confiabilidad y seguridad de un sistema de ingeniería, antes de ser puesto en uso. Esto en sí mismo constituye una ventaja de esta metodología. Un diseño seguro ofrecerá consecuentemente seguridad para los usuarios finales.

Diseño seguro y fácil de usar

Aspectos globales: actualmente las simulaciones híbridas están teniendo una creciente atención a nivel global, debido a sus evidentes ventajas, lo cual genera un gran potencial a nivel académico investigativo y económico, pues al ser un campo poco explotado comercialmente, existe mucho potencial para su desarrollo e implementación. La idea misma de dividir un experimento en dos instancias es creativa e innovadora. Si a eso se le suma que se trata de un campo extremadamente multidisciplinario, que abarca varias ramas de la ingeniería, y varias áreas del conocimiento en cada rama, se puede concluir que existe amplio campo para la innovación.

Ambientales: Desde el punto de vista económico, en que no solo se puede ver a las simulaciones híbridas como un ahorro de dinero, también ocurren otro tipo de ahorros, como el de recursos porque al requerir menos equipamiento, supone un uso menor de recursos. Por ejemplo: un experimento en escala real de un edificio requeriría la construcción del edificio sobre una mesa vibratoria, lo que genera consumo de materiales, mano de obra y tiempo. Una vez finalizado el experimento, los recursos usados se convierten en desechos, lo cual no contribuye a una economía circular y amigable con el medio ambiente. Al contrario, las simulaciones híbridas constituyen una contribución al medio ambiente de acuerdo al modo que opera, y ayuda a disminuir el consumo de recursos tales como energía, materia prima, materiales, mano de obra de técnicos y tiempo.

Salud Pública: Un diseño estructural seguro y confiable está directamente vinculado con temas de salud pública. Las simulaciones híbridas contribuyen al estudio de estructuras de ingeniería que ofrezcan funcionalidades óptimas

para el usuario final, de una forma más rápida y económica. Al mismo tiempo, debido al costo más eficiente que este tipo de ensayos tienen, los proyectos de ingeniería pueden ser más económicos en su costo global, beneficiando potencialmente a la sociedad, al permitir que proyectos de uso social puedan ser puestos a disposición del público a menor costo.

1.2 Justificación

La simulación híbrida es una técnica ciber física (experimental + computacional) muy poderosa. En esencia la simulación híbrida combina la experimentación física en un laboratorio con la simulación computacional en un ordenador. Esta interfase entre el subsistema físico y el subsistema computacional, basado en un esquema de partición cuidadosamente estudiado, permite realizar un examen detallado del sistema completo al tiempo que se definen condiciones realistas de operación en el sistema físico. La SH se utiliza principalmente cuando un sistema es demasiado grande o complejo como para ser ensayado en el laboratorio usando técnicas de evaluación tradicionales (por ejemplo, edificios altos, represas, torres de transmisión eléctrica, embarcaciones, aeronaves, equipos y mecanismos de gran tamaño), o cuando la respuesta de un sistema físico no puede ser estimada mediante simulaciones computacionales, y su comportamiento debe ser observado bajo condiciones reales de operación. A pesar de los esfuerzos que se ha hecho para contar con modelos computacionales detallados de sistemas complejos sujetos a cargas extremas, la simulación computacional sola no es siempre suficiente para entender el comportamiento de estos sistemas o incluso las interacciones complejas dentro del mismo. En tal virtud, la SH ofrece un puente crítico hacia la expansión de la capacidad en modelado computacional, especialmente para un país con recursos limitados que no cuenta con un banco de pruebas sísmicas adecuado para estudios que, dadas las realidades geográficas, debería existir. Adicionalmente, tener capacidad de simulación híbrida en el Ecuador resultaría esencial para estudiar innovaciones no verificadas ajustadas a la realidad local, lo cual minimiza en parte la dependencia de normas y estándares importados de países con circunstancias y realidades diferentes. Nuevos materiales, o materiales y diseños locales y tradicionales, se pueden estudiar de manera más eficiente y rápida usando esta novel técnica experimental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Implementar una herramienta de simulación híbrida virtual que cuente con fase de modelado por elementos finitos, para la subestructura numérica; configuración por espacios de estado de una simulación dinámica de la subestructura física; diseño de control de trayectoria y análisis y compensación de atraso en el tiempo en la interfaz numérico-experimental; y un sistema de supervisión general que permita desarrollar un ensayo íntegro con distintas configuraciones de una estructura de ingeniería.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una plataforma de ensayo virtual, realizada en MATLAB/Simulink, que incluya dos subestructuras virtuales (física y computacional), un bloque de control de trayectoria y una instancia para presentación y visualización de resultados.
- Construir un modelo de elementos finitos de una estructura de ingeniería seleccionada en base a la revisión literaria.
- Construir un modelo de sistema de transferencia que incluya un cilindro servohidráulico, un controlador de trayectoria, y la dinámica de los sensores de fuerza y desplazamiento.
- Comparar los resultados referencial y experimental y establecer métricas de rendimiento.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Simulación híbrida

La simulación híbrida es una alternativa que nace a partir de la necesidad de encontrar métodos más eficientes para analizar estructuras sometidas a cargas sísmicas, de donde se presenta una solución que además de ofrecer resultados con una alta fiabilidad en su respuesta dinámica, como se observa en la figura 1.1, tiene un costo muy bajo comparado con las alternativas de soluciones con la misma fiabilidad que se ofrecen en el mercado como es el caso de las mesas vibratorias, que a pesar de que son capaces de generar resultados muy precisos, tienen un costo muy alto, por otro lado el ensayo cuasi-estático tiene un costo menor, pero entrega respuestas con un bajo realismo dinámico.

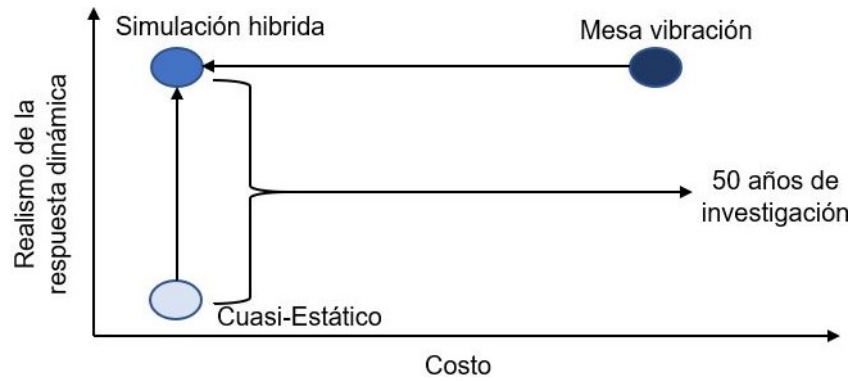


Figura 1.1: Relación entre realismo de la respuesta dinámica y el costo (Mera Muñoz, 2021)

Las simulaciones híbridas se dividen en dos partes principales: la parte crítica de la estructura es analizada experimentalmente y la parte restante es analizada a través de métodos numéricos. La parte experimental, o mejor conocida como subestructura experimental, consta de una muestra física con su respectiva masa, rigidez, y amortiguamiento, y un aparato que impone un desplazamiento sobre la muestra, ocasionando que esta genere una fuerza de reacción, que a su vez es realimentada al modelo computacional para el cálculo del siguiente paso de integración. Por otro lado, la parte numérica, o subestructura numérica, contiene la masa, rigidez y amortiguamiento de la estructura completa menos la porción que ha sido removida y que será ensayada experimentalmente. Durante las pruebas de simulaciones híbridas, la subestructura numérica se encarga de calcular los desplazamientos que serán impuestos hacia la subestructura experimental, a través del sistema de transferencia, a partir de una excitación, usualmente sísmica, a la que está sometida. Este desplazamiento es enviado como entrada a la subestructura experimental por medio de un actuador servo-hidráulico. Luego, la fuerza de respuesta que se genera en la subestructura experimental es medida y retroalimentada de regreso a la subestructura numérica para calcular un nuevo desplazamiento. (Carrion, Spencer, y Phillips, 2009)

El atractivo de este tipo de simulaciones es que permiten analizar aquellos elementos que son difíciles de modelar. En la mayoría de situaciones las fallas en una estructura son fenómenos locales, es decir que la falla comienza en una localidad muy específica, por lo que analizar la estructura en su totalidad no es necesario.

Además de las simulaciones híbridas, existen otros métodos que

permiten evaluar el comportamiento sísmico de una estructura, tales como: el método de testeo cuasi-estático y el método de testeo de la mesa vibratoria. Sin embargo, la ventaja que tiene las simulaciones híbridas es que da al investigador la posibilidad de solo analizar experimentalmente aquella parte de la estructura difícil de modelar, y el resto puede ser modelado numéricamente con las ecuaciones que gobiernan el movimiento. Sin embargo, y a pesar de sus ventajas, las simulaciones híbridas encuentran muchos desafíos a resolver tales como: errores introducido en el modelo, testeo experimental y numérico; problemas de control en la precisión del actuador que impone fuerzas sobre la muestra de la estructura; y retraso de tiempo debido a la comunicación entre ambas subestructuras (Schellenberg y Mahin, 2006).

Cabe mencionar que las simulaciones híbridas son implementadas bajo la consideración de que los elementos no dependen de la razón de carga. Esta consideración es aceptable para materiales estructurales como el concreto y el acero. Sin embargo, actualmente, se está utilizando diferentes elementos en las estructuras que dependen de la velocidad, un ejemplo son los amortiguadores viscosos. Esta necesidad de analizar estructuras dependientes de la razón de carga ha llevado a los investigadores a implementar simulaciones híbridas en tiempo real que combinan las simulaciones híbridas tradicionales con sistemas embebidos para computación en tiempo real (Nakashima, Kato, y Takaoka, 1992)

En este proyecto se implementará una simulación híbrida para una estructura de ingeniería.

1.4.2 Subestructura numérica

Para añadir una estructura de ingeniería a la simulación híbrida se necesita realizar previamente la partición, esto es, dividir el modelo matemático de la estructura en dos: la parte numérica y la parte experimental. En esta subestructura solo se añadirá la parte numérica.

Una vez se haya realizado la partición y añadido solo la parte numérica a esta subestructura se procede a aplicar las ecuaciones del movimiento de un sistema de varios grados de libertad, que están dadas por

$$M_r \ddot{x} + C_r \dot{x} + K_r x = -M_r l \ddot{x}_g \quad (1.1)$$

Donde M_r , C_r y K_r son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura de referencia, respectivamente. \ddot{x} , \dot{x} y x son los vectores de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, respectivamente. \ddot{x}_g es la aceleración del suelo que, en la ecuación de movimiento, va acompañado de un vector direccional I que proporcionará un valor de 1 a cada masa de la estructura con el objetivo de que la aceleración \ddot{x}_g sea multiplicada por cada masa inercial que se haya elegido en el modelado numérico.

Inicialmente la estructura tiene una matriz de masa, amortiguamiento y rigidez definidas en el modelado matemático, pero al particionarla, parte de la estructura se traslada a la subestructura experimental. Esto quiere decir que la matriz original será la suma de las matrices de cada parte que fue añadido a cada subestructura luego de la partición, y estará dado por

$$M_r = M_e + M_n \quad K_r = K_e + K_n \quad C_r = C_e + C_n \quad (1.2)$$

Donde los índices n y e definen que la variable sea relacionada a la estructura numérica o la experimental, respectivamente. Al reemplazar la ecuación 1.1 en 1.2 obtenemos lo siguiente.

$$M_n \ddot{x} + C_n \dot{x} + K_n x = -M_r I \ddot{x}_g - \underbrace{(M_e \ddot{x} + C_e \dot{x} + K_e x)}_{f_e} \quad (1.3)$$

Donde f_e es un vector de retroalimentación de fuerza asociado con la subestructura experimental.

Si representamos la subestructura numérica en espacios de estados, obtenemos lo siguiente.

$$\begin{cases} \dot{z}_n = \mathbf{A}_{ns} z_n + \mathbf{B}_{ns} u_n \\ y_n = \mathbf{C}_{ns} z_n + \mathbf{D}_{ns} u_n \end{cases}$$

Donde \mathbf{A}_{ns} es la matriz de estados, \mathbf{B}_{ns} es la matriz de entrada, \mathbf{C}_{ns} , \mathbf{D}_{ns} es la matriz de retroalimentación, z_n es el vector de estados, u_n es el vector de entrada y y_n es el vector de salida de la subestructura experimental.

1.4.3 Subestructura experimental

Es la parte física del experimento de simulación híbrida, que surge al separar aquella porción de la estructura de referencia con más incertidumbres y complejidades dinámicas difíciles de modelar en elementos finitos, con el fin de conseguir un mayor realismo en la respuesta. Para esto se requiere una serie de elementos fundamentales para el desarrollo de este como el actuador, sensores de posición y de fuerza y controlador.

1.4.4 Actuador

Se encarga de aplicar los desplazamientos obtenidos a través del análisis de elementos finitos en cada tiempo de muestreo, es decir es el elemento que debe transferir movimiento a la estructura para replicar los movimientos que esta realiza cuando está sujeta a movimientos de excitación. El sistema actuador + servoválvula + controlador interno de trayectoria se denomina sistema de transferencia

1.4.5 Controlador y compensador

El controlador junto con el compensador asegura un adecuado seguimiento de la trayectoria de comando en el actuador, al corregir diferencias de amplitud y reducir el tiempo de retraso que existe entre ambas subestructuras. Existen diversos controladores que permiten reducir el tiempo de retraso y, además, que permita a la planta obtener los parámetros de salida deseados. Para este proyecto se utilizará un regulador lineal cuadrático (LQR), y un controlador proporcional-integral-derivativo (PID), para poder realizar comparaciones entre ambos tipos de controladores.

1.4.6 Sensor de posición

Es el encargado de medir los cambios de posición del actuador servohidráulico, y por ende, de la subestructura física. Usualmente en este tipo de aplicaciones se utilizan sensores del tipo *linear variable differential transformer* (LVDT) instalados internamente en los actuadores. Las mediciones de posición del actuador se utilizan como señal de retroalimentación del controlador del actuador.

1.4.7 Sensor de fuerza

Similarmente, el sensor de fuerza o celda de carga mide la fuerza generada en el actuador, producto del desplazamiento impuesto a la subestructura física. Dicha fuerza es enviada como señal de retroalimentación pero a la subestructura numérica, la cual se encuentra realizando el análisis de elementos finitos, y permite que complete su

ciclo de cálculo del siguiente paso de desplazamiento, con los datos de fuerza de la subestructura experimental.

1.4.8 Identificación de sistema

Es el proceso mediante el cual se obtiene la función de transferencia de una planta a partir de los datos experimentales medidos, para lo cual se requieren los datos de entrada $u(t)$ y de salida $y(t)$ medidos a una frecuencia de muestreo F_m regular, adicionalmente cuando se toman los datos se deben considerar ruido o perturbaciones $e(t)$, las cuales son señales con medida desconocida como se muestra en la figura 1.2.

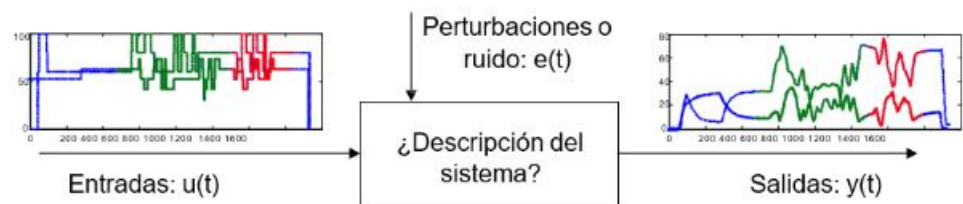


Figura 1.2: Descripción de un sistema con entradas, perturbaciones y salidas

De manera general los sistemas se pueden identificar obteniendo los datos on-line u off-line.

1.4.9 Identificación off-line

El proceso de identificación off-line consiste en realizar una serie de experimentos para obtener datos del sistema a identificar, posteriormente se toma los datos y se los procesa para obtener un modelo del sistema que funciona bajo ciertos parámetros o puntos de operación.

1.4.10 Identificación On-line

A diferencia de la identificación off-line, esta es mucho mas versátil pero requiere de muchos mas recursos computacionales y mas complejos ya que constantemente, se encuentra identificando y corrigiendo los cambios del sistema de datos obtenidos de un servidor on-line, por lo cual permite mejorar el porcentaje de ajuste entre la planta real y la función de transferencia identificada de la planta.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se explica el procedimiento para llevar a cabo el experimento virtual, así como los lineamientos que se va a seguir para poder desarrollar el mismo. Se explicará en detalle procedimientos tales como construir la función de transferencia de la planta, la ejecución del experimento para visualizar los resultados, las ecuaciones que van a ser requeridas, entre otros. El proceso estará conformado por los siguientes pasos:

2.1 Software computacionales

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizará el software de MATLAB (Matlab, 2020) con las siguientes características

Tabla 2.1: Características de Software

Nombre	Versión	Procesador	Número de licencia
MATLAB	R2020b (9.1.0.441655)	64 bits	365148

El cual es un software numérico con su propio lenguaje de programación (Lenguaje M) que permite trabajar con matrices, manipular datos numéricos e implementar algoritmos, además de contar características únicas para sistemas de control, como programas para identificar sistemas, lo que vuelve a herramienta, ideal para el desarrollo del proyecto, y para poder implementarlo en su totalidad.

Además de MATLAB, se utilizará las siguientes extensiones o toolboxes que posee el programa:

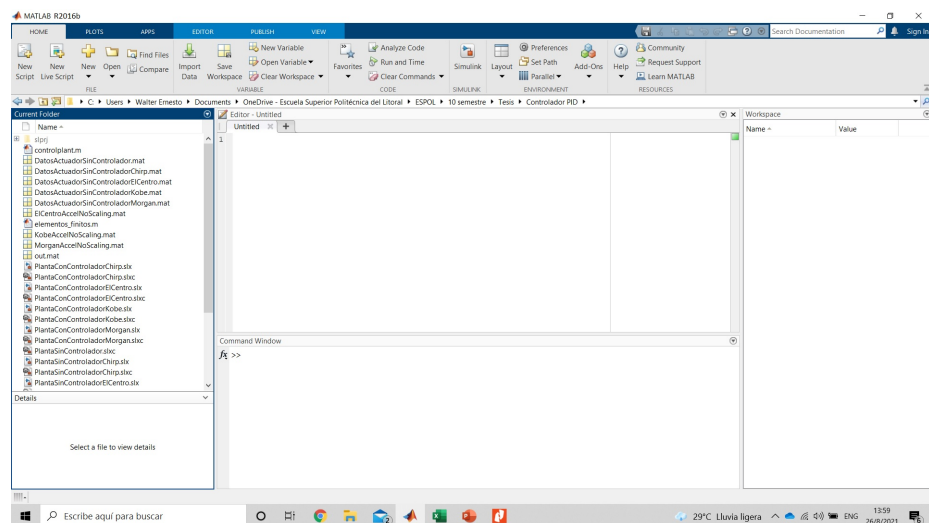


Figura 2.1: Interfase gráfica de MATLAB

- **Simulink:** Es una plataforma de simulación de sistemas multidominio, que permite modelar plantas de control, interactuar con ellas y obtener datos, además que cuenta con una librería muy extensa y completa para modelado dinámico, y realizar trabajos interconectados con códigos escritos en MATLAB.

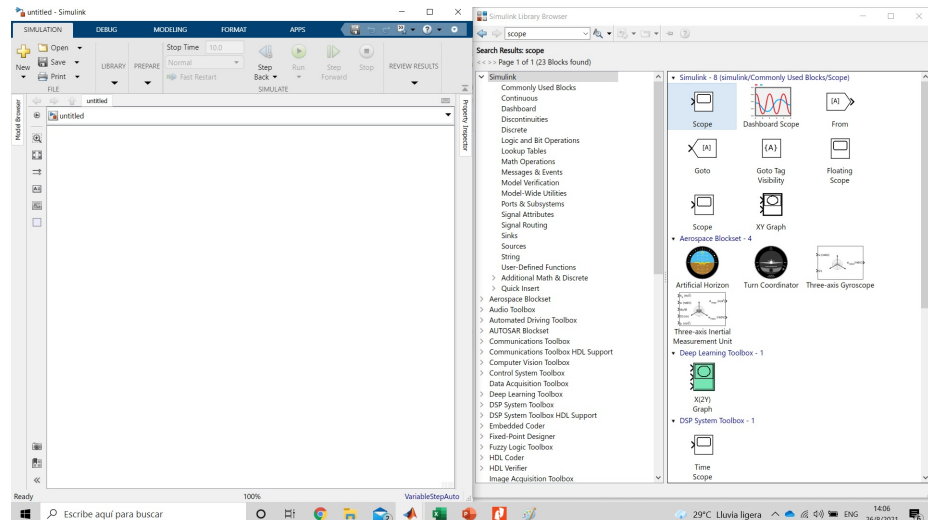


Figura 2.2: Interfase gráfica de Simulink

- **System Identification toolbox:** Esta caja de herramientas de MATLAB permite crear funciones de transferencia de plantas, con estructuras previamente definidas por el usuario, en el dominio del tiempo o la frecuencia, con datos medidos de entrada y salida de una planta. Estos modelos matemáticos obtenidos pueden ser usados para predecir comportamientos de plantas de caja gris (dinámicas parcialmente conocidas).
- **Control System Design Toolbox:** Esta herramienta permite observar y modificar planta implementando controladores, o agregando directamente polos o ceros de acuerdo a las necesidades del usuario.

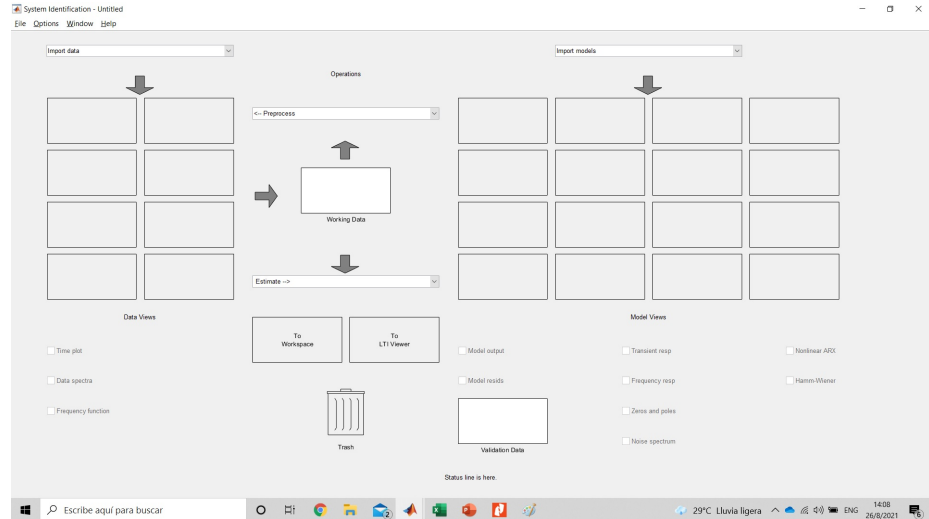


Figura 2.3: Interfase gráfica de Control System Design Toolbox

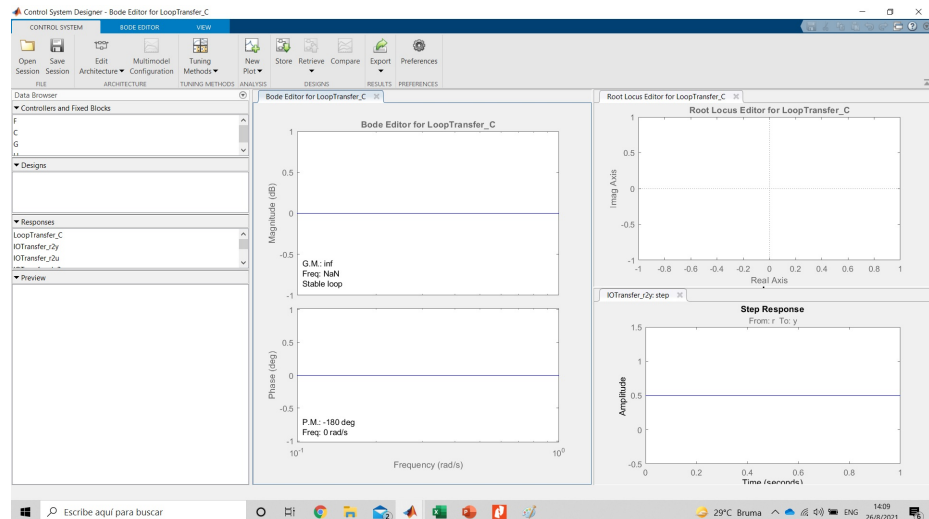


Figura 2.4: Interfase gráfica de System Identification Toolbox

2.2 Cargas sísmicas

Dado que el objetivo del proyecto es realizar ensayos a estructuras sometidos a cargas sísmicas, se deberá imponer dichas cargas a la subestructura numérica. Para esto se utilizará 3 registros de aceleraciones sísmicas históricas que ocurrieron en el Siglo XX, ampliamente conocidas y estudiadas por lo fuertes y devastadoras que fueron para las estructuras de aquellos lugares donde ocurrieron:

Adicionalmente, para motivos de análisis de la planta, se implementará una señal adicional con los datos que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.2: Cargas sísmicas

Nombre	Año	Magnitud	ubicación
El centro	1940	6.9	Valle Imperial, California, Estados Unidos
Morgan	1984	6.2	Valle Santa Clara, California, Estados Unidos
Kobe	1995	6.9	Kobe, Hyōgo, Japón

Tabla 2.3: Señal de estudio

Tipo	Frecuencia inicial	Frecuencia final	Tiempo Objetivo
Barrido sinusoidal lineal	0.01 Hz	40 Hz	50 seg

2.3 Subestructura numérica

Las cargas sísmicas que se detallan en la tabla 2.2 son impuestas a una estructura de ingeniería diseñada por Gao (2012). En la figura 2.5 se muestra el detalle y las especificaciones de la estructura.

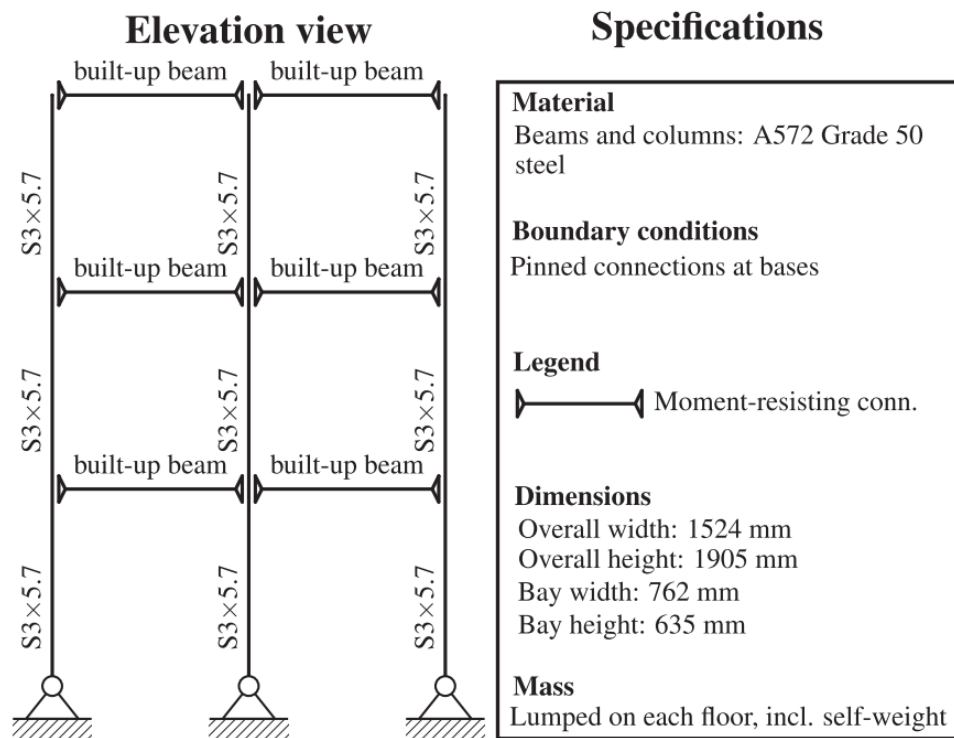


Figura 2.5: Modelo de la estructura de ingeniería (Silva y cols., 2020)

La estructura tiene 30 grados de libertad. Las columnas fueron hechas con secciones comerciales de S3×5.7. Los elementos de la viga unión son ensamblajes soldados. Tanto las vigas y la columnas están hechas de acero estructural. Esta estructura se diseñó utilizando el concepto de columna fuerte viga débil. Luego de definir la estructura de análisis se realiza un modelo de elementos finitos y, además, se reduce los grados de libertad en 3

utilizando el método de condensación estática (Silva y cols., 2020).

Cabe destacar que cada uno de los pisos de la estructura tiene la misma masa y el mismo coeficiente de amortiguamiento que son 1000 kg y 0.05, respectivamente.

2.4 Actuador

Los experimentos de simulaciones híbridas reales utilizan actuadores servohidráulicos de tipo dinámicos. Sin embargo, como no se cuenta con estos equipos localmente, se los simulará a través de MATLAB-Simulink. Para este proyecto se utilizará datos de ensayos realizados en el actuador con las siguientes características.

Tabla 2.4: Características del actuador servo-hidráulico lineal

Marca	Modelo	Fuerza nominal	Carrera
Shore Western	serie 910D	10,28 kN	± 63 mm

El proceso de identificación de la función del actuador y la servo-válvula utilizará datos recolectados de la entrada y salida del actuador sin carga.

Tabla 2.5: Características de datos recolectados

Tipo de señal	Amplitud	Frecuencia
Sinusoidal	2 V	1 Hz
Barrido sinusoidal logarítmico	2 V	[0,50] Hz
Barrido sinusoidal logarítmico	3 V	[0,50] Hz
Barrido sinusoidal logarítmico	4 V	[0,50] Hz
Ruido blanco de ancho de banda limitado	2 V	[0,50] Hz
Ruido blanco de ancho de banda limitado	3 V	[0,50] Hz
Ruido blanco de ancho de banda limitado	4 V	[0,50] Hz

Para poder modelar el actuador, es decir encontrar una función de transferencia que se ajuste al comportamiento físico, se realizará el siguiente proceso, el mismo que se muestra de manera esquemática en la figura 2.6 :

- I. Realizar un preproceso a los datos crudos obtenidos del actuador: asegurar sincronización, eliminar cambios alrededor del cero y filtrarlos adecuadamente para eliminar picos de transientes a altas frecuencias.
- II. Identificar el tipo de sistema off-line, es decir seleccionar la estructura y el método adecuado para el modelo. Para el caso del actuador hidráulico, como esta conformado por dos componentes, la servo válvula y el actuador, se requerirá de una estructura de al menos dos polos, pero esto dependerá de el nivel de similitud al momento de validar la función

determinada en el dominio del tiempo, todo esto se realizará con la ayuda del SIT de MATLAB.

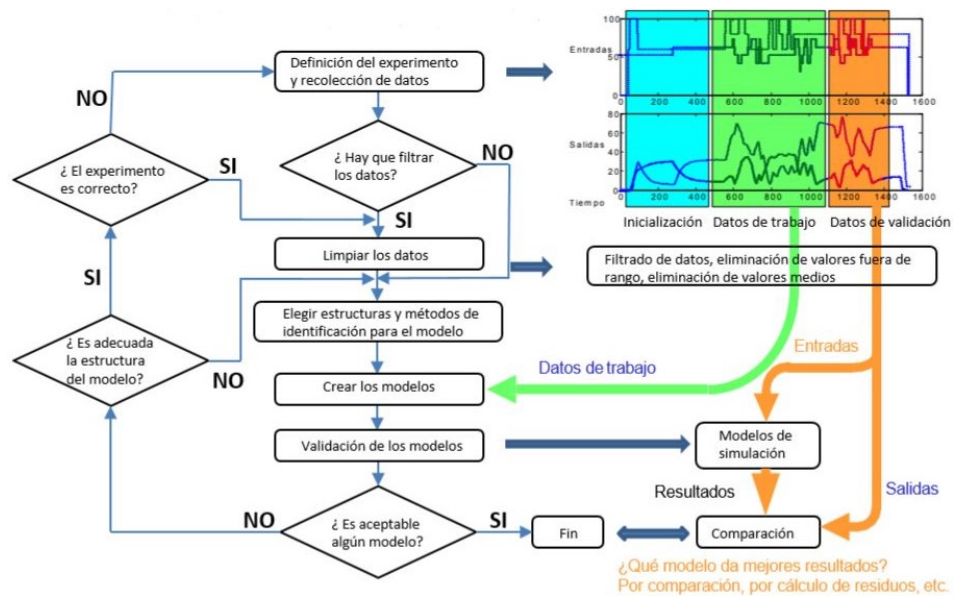


Figura 2.6: Proceso de identificación de un sistema.

- III. Una vez identificado el sistema en el dominio del tiempo se realizará un análisis en frecuencia para evaluar el comportamiento de la función de transferencia ya estimada, para esto se utilizará los datos experimentales para poder comparar el resultado modelado con el resultado experimental y poder obtener una estimación de la precisión de la función de transferencia obtenida.
- IV. Por último, se modelará el sistema del actuador al mismo que se le deberá agregar un controlador en Simulink.
Esta parte será la representación virtual de lo que sería el banco de ensayo de pruebas sísmicas.
- V. A la salida del actuador se modelará la parte de la partición de la estructura que requiera mayor análisis.
- VI. Adicionalmente, se agregarán dos sensores de fuerza y posición, los mismos que servirán como retroalimentación para la estructura y el actuador.

Luego de haber realizado el procedimiento de identificación de sistema, la función de transferencia obtenida se lo convierte en espacios de estados como se muestra en la ecuación 2.1.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (2.1)$$

2.5 Alternativas de diseño para el controlador

Como ya se ha mencionado anteriormente, se debe diseñar un controlador de trayectoria que sea capaz de seguir la señal de comando, es decir, reducir el error por retraso de posición. Para esto, se evalúa distintos controladores como PID, full state feedback y LQR.

Se utilizará una matriz de decisión para poder elegir el mejor controlador para realizar el experimento virtual. en donde 5 representa que el controlador cumple con la característica de la columna y 1 que no cumple con la característica de la columna.

Tabla 2.6: Matriz de decisión

Factores	AP	RP	RDP	FI	S	Puntuación
Peso	4	3	5	2	1	-
PID	1	3	3	5	5	43
LQG	5	4	4	3	3	61
Full state feedback	3	3	3	4	4	48

Los factores que se usó para decidir sobre el mejor controlador son 1) AP: Adaptabilidad a incertidumbres de la planta; 2) RP: rapidez de la respuesta; 3) RDP: rastreo de posición; 4) FI: facilidad de implementación, y; 5) S: simplicidad.

Adaptarse a incertidumbres de la planta es el primer factor que se consideró. Al diseñar un controlador se necesita conocer la función de transferencia de la planta del sistema, sin embargo, esta función de transferencia puede variar dependiendo del actuador o de la parte de la subestructura experimental que se use.

El segundo factor que se consideró es la rapidez de respuesta ya que un controlador debe permitir al sistema de control llegar a la respuesta deseada lo más rápido posible.

El tercer factor que se consideró es el rastreo de posición, el cual también es el más importante. Como lo que se desea es que la señal de salida de la

subestructura experimental sea igual a la señal de entrada, se necesita que el controlador pueda disminuir el error existente entre ambas señales.

El cuarto factor a considerar es la facilidad de implementación. Este factor se refiere a la facilidad con que se puede diseñar el controlador físico. A diferencia del controlador LQR y el controlador full state feedback, el controlador PID es el que más se utiliza en la industria y por eso es el de mayor valor en la matriz decisión en este parámetro. Por otro lado, el quinto factor es la simplicidad que se refiere a la facilidad de poder analizar el controlador junto con la planta de control; en este caso, la metodología que se realiza para poder encontrar los parámetros del controlador PID es más sencilla que los demás tipos de controladores.

PID

El controlador PID es el más utilizado en los sistemas de control industrial, además, también, en aplicaciones en donde se requiera controlar variables continuas. Este tipo de controlador está compuesto por 3 términos: un término proporcional, un término integral y un término derivativo. Este controlador se lo ubica en cascada con la planta y añade como máximo un polo y dos ceros para que los polos en lazo cerrado del sistema se ubiquen una posición deseada con el objetivo de obtener una respuesta igual a la de la referencia.

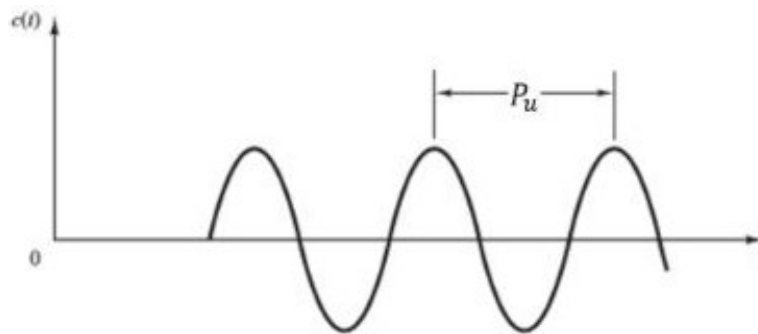


Figura 2.7: Oscilación sostenida para obtención de PID en método Ziegler-Nichols

Para poder sintonizar el controlador se utiliza un método que se conoce como Ziegler-Nichols el cual es un método experimental implementado en 1942. Consiste en colocar el controlador proporcional K_u e ir variando el parámetro hasta obtener una respuesta del período y amplitud constante. Posteriormente, se determina la longitud de la onda como se muestra en la Figura 2.7.

El valor de P_u es el período de oscilación medido en segundos. Una vez determinados estos dos parámetros se utiliza las fórmulas que se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Sintonización de controladores con método Ziegler-Nichol

Controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.5K_u$	∞	0
PI	$0.45K_u$	$P_u/1.2$	0
PID	$0.45K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

Dependiendo de los requerimientos del controlador, se define si se va a construir con controlador P, PI o PID.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.2)$$

Full state feedback

Full state feedback es un controlador que se utiliza con sistemas de control representado en espacios de estados. A diferencia del controlador PID en donde se ubican polos y ceros para mover los polos de la función en lazo cerrado, un controlador full state feedback utiliza un vector de ganancia K para retroalimentar cada variable de estado y ubicar los polos en lazo cerrado donde se desee. Este controlador, al ser utilizado en una representación de espacios de estados, es más útil cuando se tiene un sistema de control multivariable. Sin embargo, tiene la limitación de que, para poder ser implementado, todos los estados del sistema deben ser observables, ya sea mediante mediciones o estimaciones.

LQR El controlador LQR permite optimizar la ubicación de los polos para obtener la respuesta del sistema deseada. Este controlador el cual tiene el mayor puntaje en la matriz de decisión se detallará en la siguiente sección.

2.6 Controlador

En el diseño de control de un experimento virtual de simulación híbrida existen errores que ocasionan que la señal de salida de la subestructura numérica sea diferente a la señal de entrada de la subestructura experimental. Estos errores son ocasionados debido a los diferentes elementos que componen el sistema de control. En este trabajo se destaca dos errores: el error por rastreo de posición y el error por retraso de tiempo. El error por rastreo de posición será reducido utilizando un controlador,

mientras que el error por retraso de tiempo será reducido utilizando un precompensador y que se detallará en la Sección 2.8.

Como ya se mencionó, para reducir el error por retraso de posición, se utiliza un controlador; varios autores han diseñado diferentes controladores que cumplen con esta tarea. Para este proyecto, se utilizó un controlador linear-quadratic-regulator, que será nombrado de ahora en adelante como controlador LQR.

El controlador LQR es el encargado de proporcionar un vector de ganancia que optimice las condiciones deseadas, que en este caso, lo que se desea es reducir el error por rastreo de posición. Por medio de este vector de ganancia, los polos se mueven a una posición en la que la entrada de referencia es igual a la salida.

Las ventajas de utilizar este tipo de controlador es que toma en cuenta el ruido que puede ser proporcionado a cada una de las variables de estado.

Antes de empezar con el diseño del controlador, primero se analiza la controlabilidad y la observabilidad del sistema. En el caso de que el sistema no sea completamente controlable implica que no todas las variables de estado podrán ser controladas y se deberá utilizar un procedimiento en donde el sistema se divide en dos subsistemas, uno controlable al cual se le aplicará el controlador y uno no controlable. Por otro lado, en el caso de que no sea observable implica que no se podrá saber las variables de estado midiendo las salidas del sistema.

Tomando en cuenta las matrices A y B de la ecuación 2.1, se puede hallar la matriz de controlabilidad como sigue.

$$C_O = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Luego, si el rango de la matriz C_O es igual a la dimensión de la matriz A , entonces se dice que el sistema es totalmente controlable.

Por otro lado, para conocer si el sistema es observable se necesita tomar en cuenta la matriz A , nuevamente, y la matriz C de la ecuación 2.1.

$$\mathbf{OB} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Luego de obtener la matriz \mathbf{OB} se realiza el procedimiento para encontrar el rango de esa matriz; si el rango de la matriz \mathbf{OB} es igual a la dimensión de la matriz \mathbf{A} , entonces el sistema es observable.

Luego de analizar el espacio de estados del sistema se procede a diseñar el controlador LQR, el cual es un retroalimentador de estados, en otras palabras, una matriz de ganancia \mathbf{K} el cual es la óptima para la planta. Para determinar los elementos de esta matriz, se utiliza la función de costo mostrada en la ecuación 2.5

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2} \int_{\infty}^{t_0} [\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + y_{Gc}^T \mathbf{R} y_{Gc}] dt \quad (2.5)$$

Los elementos \mathbf{Q} y \mathbf{R} mostradas en la ecuación 2.5 son matrices de peso los cuales se definen como sigue

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{R} = \beta \quad (2.7)$$

$\alpha, \psi, \gamma, \kappa, \lambda$ y β son parámetros escogidos en el diseño. Los valores que se escogió de estos parámetros son los siguientes

Para que a partir de la ecuación 2.5 se obtenga la matriz de ganancia \mathbf{K} se resuelve la función de Riccati (Ogata, 2010). Sin embargo, una alternativa es utilizando las herramientas de MATLAB (Matlab, 2020) con las entradas como se muestra en la ecuación 2.8, en este caso, la función `lqr.m`, cuya aplicación es

$$\mathbf{K} = \text{lqr}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}) \quad (2.8)$$

Tabla 2.8: Valores paramétricos de la planta de control

Parámetro	Valor
α	1000000
ψ	100
γ	100
κ	100
λ	100
β	0.001

2.7 Sensores

Como se explicó en la sección anterior, los sensores son los encargados de medir los datos de las variables deseadas, pero como se trata de una simulación híbrida virtual, en este caso no serán una opción netamente requerida ya que se puede obtener los datos de cualquier parte del sistema al extraerlos del modelo de Simulink, pero con el objetivo de replicar un sistema lo mas real posibles los sensores serán bloques con ganancia unitaria y una señal de ruido para aumentar el realismo de la simulación.

2.7.1 Sensor de posición

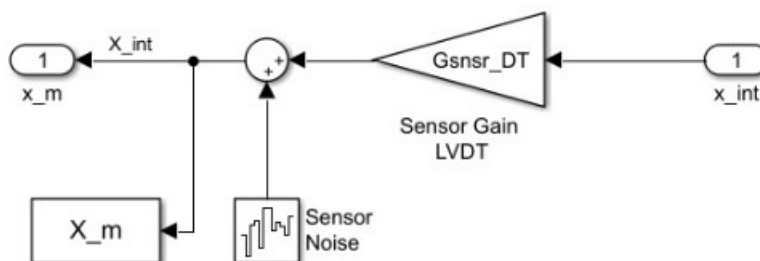


Figura 2.8: Diagrama de bloques del sensor de posición (Silva y cols., 2020)

Como se puede observar en la figura 2.8, el sensor de posición va a estar compuesto de un bloque de ganancia y, adicionalmente, se le agrega una señal de ruido para simular el ruido en un sensor real. Únicamente como referencia la señal del sensor de posición será enviada como retroalimentación de vuelta al controlador del actuador.

2.7.2 Sensor de fuerza

Como se puede observar en la figura 2.9 el sensor de fuerza va a estar compuesto de un bloque de ganancia y, adicionalmente, se le agrega una señal de ruido para simular el ruido en un sensor real, de la misma manera

como se lo hizo para el sensor de fuerza. Únicamente como referencia, la señal del sensor de fuerza será enviada a la simulación computacional.

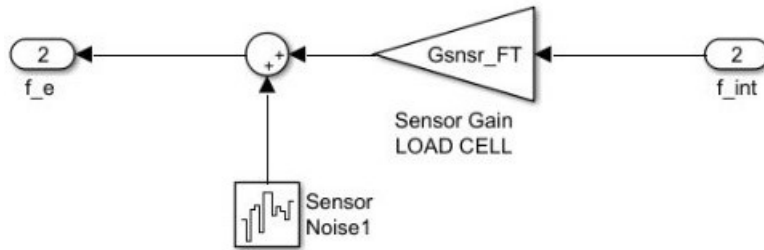


Figura 2.9: Diagrama de bloques del sensor de fuerza (Silva y cols., 2020)

2.8 Tiempo de retraso y compensación

El tiempo de retraso es un período de tiempo que se presenta debido al desarrollo virtual del proyecto, es decir, un desfase entre la estructura experimental y la estructura numérica. Para corregir ese desfase se debe implementar un componente capaz de compensar ese retraso que ocurre en la fase del sistema, y es, precisamente, lo que hace un compensador de adelanto de fase, aumentar la fase del sistema entre dos frecuencias establecida. En la Figura 2.10 se puede observar que el compensador aumenta el ancho de banda incrementando la frecuencia del cruce de la ganancia (Nise, 2020).

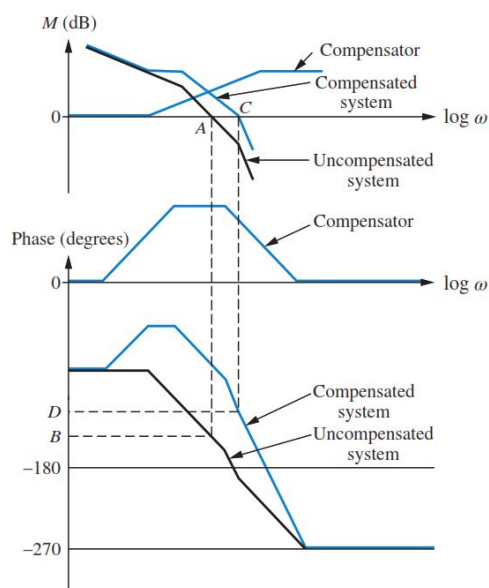


Figura 2.10: Compensación de adelanto de fase en el diagrama de fase (Nise, 2020)

2.9 Compensador de adelanto de fase

Este compensador de adelanto es una función de transferencia la cual cuenta con un polo y un cero, como se muestra en la ecuación 2.9, con la particularidad de que el polo es mayor que el cero, de esta manera el cero se encuentra mas cerca del eje imaginario y el polo lejos del mismo haciendo que la banda ancha del sistema en lazo cerrado aumenta, produciendo que la respuesta del sistema sea mas rápida y así poder compensar este retraso.

$$G_c = k_T \frac{s + Z_1}{s + P_1} \quad (2.9)$$

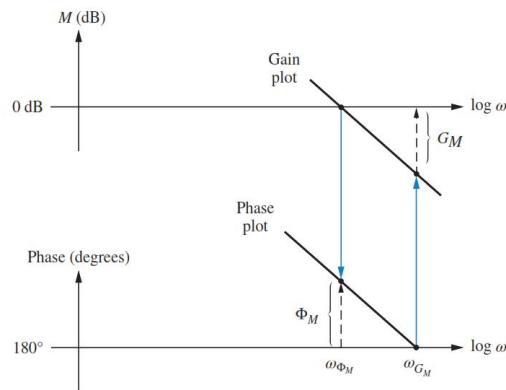


Figura 2.11: Margen de ganancia y fase (Nise, 2020)

Para poder determinar los parámetros, lo primero que se requiere es obtener el diagrama de Bode en lazo abierto de la planta en serie con el controlador previamente establecido, $G_P \times G_c$, con el cual se puede determinar el margen de fase Φ_M y la frecuencia a la que ocurre el margen de fase ω_{Φ_M} . Como se puede observar en la Figura 2.11, el margen de fase son los grados que le faltan para llegar a -180° a la misma frecuencia en donde la ganancia se encuentra en 0 dB.

$$G_c = \beta \frac{s + \frac{1}{aT}}{s + \frac{1}{T}} \quad (2.10)$$

Posteriormente, se debe encontrar los valores del controlador de la forma que se muestra en la Ecuación 2.10, donde aparecen dos variables que serán determinadas a partir de los criterios de diseño:

- Colocar el cero entre los 15 a 30 Hz para conseguir disminuir el tiempo de levantamiento y el de asentamiento.
- Colocar el polo lo mas alejado posible para reducir el overshoot pero aumentando el tiempo de levantamiento y el de asentamiento.

Después de definir los parámetros de diseño, se obtiene los valores de a y T con las ecuaciones que se describen a continuación:

$$a = \frac{1 + \sin(\Phi_M + \Phi_{\text{adicional}})}{1 - \sin(\Phi_M + \Phi_{\text{adicional}})} \quad (2.11)$$

Para el caso del valor de a únicamente se requiere el margen de fase Φ_M y una fase adicional $\Phi_{\text{adicional}}$ el cual es un ángulo que se le agrega como seguridad, y va entre un rango de 5 a 12 grados.

$$T = \frac{1}{\omega_{\text{max}} \sqrt{a}} \quad (2.12)$$

De aquí se obtiene el segundo del compensador, el mismo que depende de a y ω_{max} el cual es la velocidad angular donde ocurre la fase máxima del compensador como se muestra en la Figura 2.12.

Por ultimo, el valor de β es un valor que se obtiene a partir de a multiplicado por un factor a conveniencia, en este caso por un factor de 2.

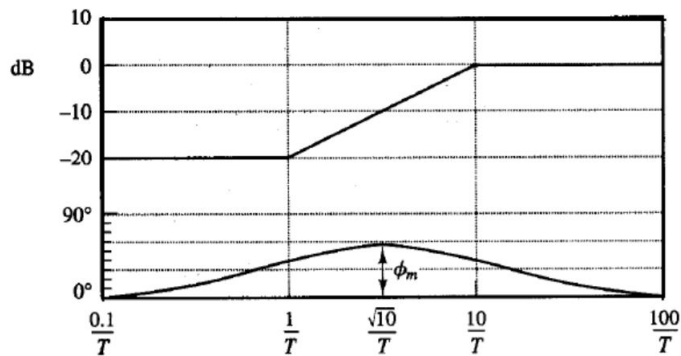


Figura 2.12: Diagrama de fase del compensador de adelanto

2.10 Criterio de evaluación

El criterio que se tomó en cuenta para la evaluación del experimento virtual es la raíz cuadrada media normalizada o RMS del seguimiento de posición. Este indicador, J_1 , representa la diferencia que existe entre la señal de salida de la subestructura numérica y la señal de salida de la subestructura experimental. Este indicador es útil ya que lo que se desea es que la señal de la subestructura numérica sea la misma que la señal de la subestructura experimental, en otras palabras, que la subestructura experimental tenga el mismo movimiento que la subestructura numérica. La ecuación de este indicador está dada por

$$J_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [x_m(i) - y_n^{(1)}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [y_n^{(1)}(i)]}} \times 100 \% \quad (2.13)$$

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se detallará los resultados obtenidos al finalizar con el diseño del sistema de control del experimento virtual. Cabe destacar que el objetivo es reducir el error de la señal de entrada de la subestructura experimental al diseñar el controlador y el compensador.

3.1 Análisis del sistema de control sin controlar

Como primer resultado se presenta la función de transferencia identificada.

$$G(s) = \frac{1.668 * 10^4}{s^2 + 295.1 * s + 1.552 * 10^4} \quad (3.1)$$

Esta función se puede considerar válida ya que tiene un porcentaje de ajuste del 91.4% como se puede observar a continuación.

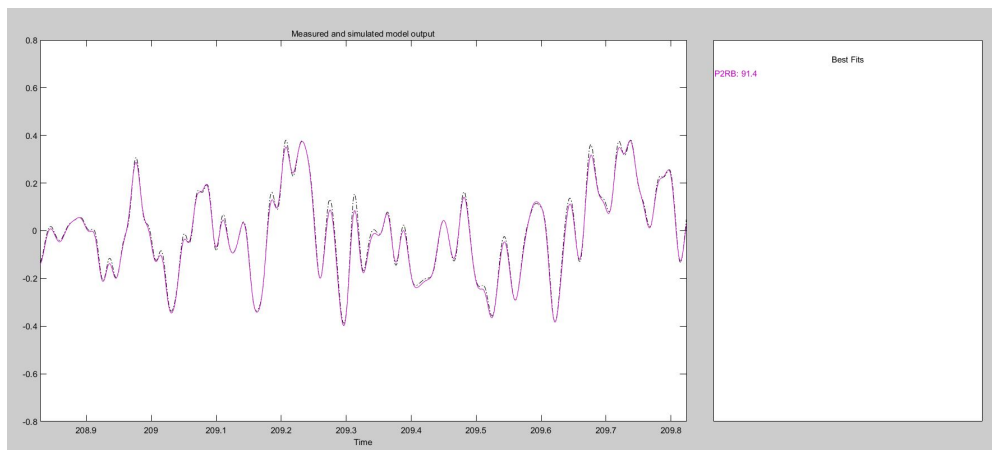


Figura 3.1: Porcentaje de ajuste de la función de transferencia identificada del actuador

Este valor obtenido indica que la señal de salida obtenida a través de la función de transferencia es en un 91.4% igual a la señal de salida obtenida de la toma de datos, y para que una función se considere aceptable debe estar por arriba del 80% de ajuste, por lo cual se la considera válida. Ya que el análisis en el dominio del tiempo fue satisfactorio ahora se comprueba que el comportamiento en el dominio de la frecuencia también sea igual. Este se lo realizará de manera visual entre los datos tomados y la respuesta de la función.

Una vez realizado el análisis en el dominio del tiempo se pasa a comprobar que su comportamiento en el dominio de la frecuencia sea válido, para lo cual se comparó visualmente el comportamiento en el dominio de la

frecuencia en magnitud y fase.

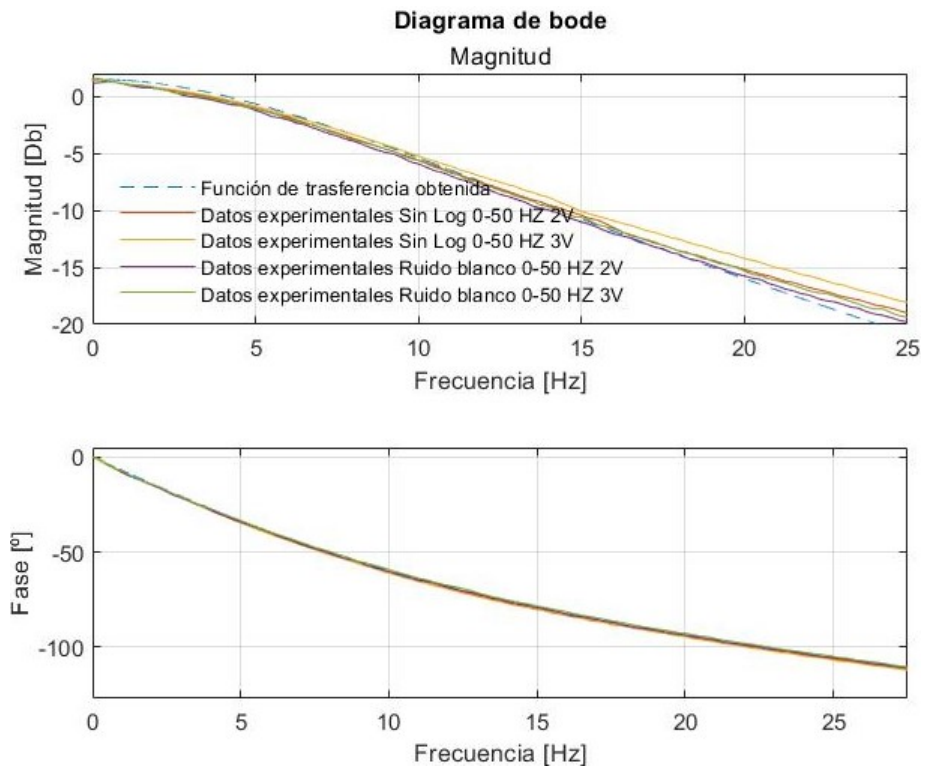


Figura 3.2: Análisis en el dominio de la frecuencia

Como se muestra en la Figura 3.2, en la parte superior, se compara el comportamiento entre la función de transferencia identificada y los datos sinusoidales logarítmicos y de ruido blanco de 2 y 3 Volteos, en donde se puede observar que tienen un comportamiento bastante similar lo que significa que en cuanto a magnitud la función fue identificada correctamente; por otro lado, en términos de Fase las líneas están sobrepuestas es decir que de igual manera esta bien identifica, por lo cual se puede determinar que en términos generales tanto en magnitud como en fase la función está identificada correctamente.

Una vez que se identificó el sistema se arma la planta del actuador la cual esta formada por el diagrama de bloque del actuador, servo-válvula subestructura experimental y la respuesta de velocidad natural, como se muestra en la Figura 3.3 . Para cada bloque se explica su procedencia a continuación: para el caso de la servo-válvula y el actuador se le dio un polo a cada uno, como se muestra en la Función 3.2.

$$G(s) = \frac{16680}{(s + 226.5)(s + 68.5)} \quad (3.2)$$

La Función 3.2 es equivalente a la Función 3.1, pero vista de forma cero-polo-ganancia, el cual nos dará dos valores importantes de la planta, el polo del actuador y el de la servo-válvula, para las cuales se le asigna el polo más cercano al eje imaginario al actuador y el restante a la servo-válvula, esto se lo realizó de esta manera ya que el sistema identificado es de el actuador junto con la servo-válvula sin carga.

3.2 Análisis del sistema de control del actuador

Como se explicó en la sección anterior, la planta estará conformada por diferentes bloques como se muestra en la figura 3.3

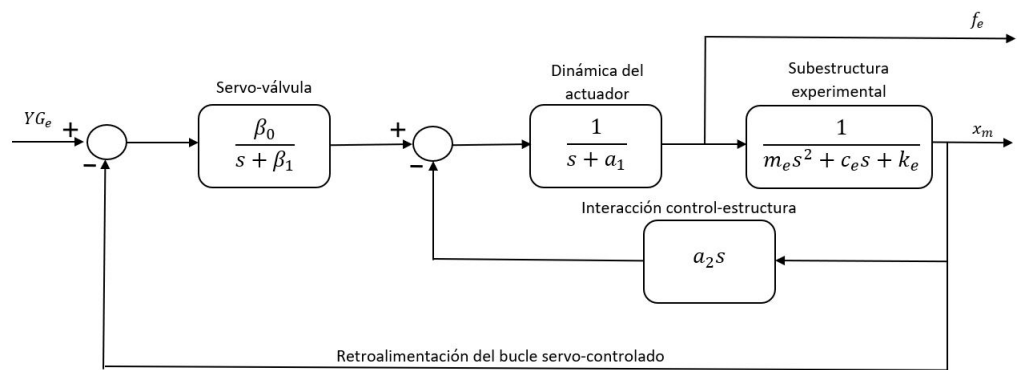


Figura 3.3: Diagrama de bloques del actuador con estructura experimental

La planta del Actuador esta conformada por cuatro bloques los cuales son detallados a continuación:

Servo-válvula: Un actuador tiene dos componentes principales la servo-válvula es una de ellas ya que es la encargada de recibir la señal eléctrica y permitir el paso del fluido al actuador. Como se mencionó en la sección anterior, esta fue identificada.

$$G_{sv} = \frac{\beta_0}{s + \beta_1} = \frac{16680}{s + 226.5} \quad (3.3)$$

Dinámica del actuador: Este es el segundo componente del mismo actuador, ya que es el que se encarga de entregar la fuerza

$$G_{da} = \frac{1}{s + a_1} = \frac{1}{s + 68.5} \quad (3.4)$$

Subestructura numérica: Esta parte es la parte de la estructura numérica que fue extraída del análisis de elementos finitos.

$$G_{sn} = \frac{1}{m_e s^2 + c_e s + k_e} \quad (3.5)$$

Donde m_e , c_e y k_e son la masa, rigidez y amortiguación de la subestructura numérica, cabe recalcar que para este punto no se le asigna ya que este puede tener el valor que establezca el usuario en función de la subestructura que desea particionar y analizar con el actuador.

Interacción control-estructura:

$$G_{ic} = a_2s = 788100s \quad (3.6)$$

Es un integrador acompañado de una constante a_2 el cual se produce debido a una reacción natural de la subestructura numérica, producto de la misma fuerza producida por el actuador al moverse, este valor fue tomado de un ensayo experimental. Una vez analizados todos los valores de la planta, se procede hacer un compendio de todos los valores en la tabla que se muestra continuación:

Tabla 3.1: Valores paramétricos de la planta de control

Parámetro	Componente	Valor nominal	Unidades
β_0	Servo-válvula	16680	m Pa/s
β_1	Servo-válvula	226.5	1/s
a_1	Actuador	68.5	1/s
a_2	Actuador	7.881×10^5	m Pa
m_e	Subestructura	29.13	kg
c_e	Subestructura	118.54	N/m
k_e	Subestructura	1.19×10^6	kg/s

Una vez observada la planta de manera detalla, se realiza una reducción de bloques para poder observar la planta de manera equivalente en sistema cerrado

$$G_{planta}(s) = \frac{B_0}{A_4s^4 + A_3s^3 + A_2s^2 + A_1s^1 + A_0} \quad (3.7)$$

Donde los coeficientes son valores agrupados en función de todas las constantes de la planta del actuador, como se muestra a continuación:

$$B_0 = \beta_0$$

$$A_0 = a_1\beta_1k_e$$

$$A_1 = a_1k_e + (a_1c_e + a_2 + k_e)\beta_1$$

$$A_2 = a_1\beta_1m_e + \beta_1c_e + a_1c_e + k_e + a_2$$

$$A_3 = \beta_1m_e + a_1m_e + c_e$$

$$A_4 = m_e$$

Una vez definidos todos los parámetros iniciales se procede a observar el comportamiento de la planta bajo las cuatro señales con las cuales se iba a

realizar el análisis descritas en el capítulo anterior.

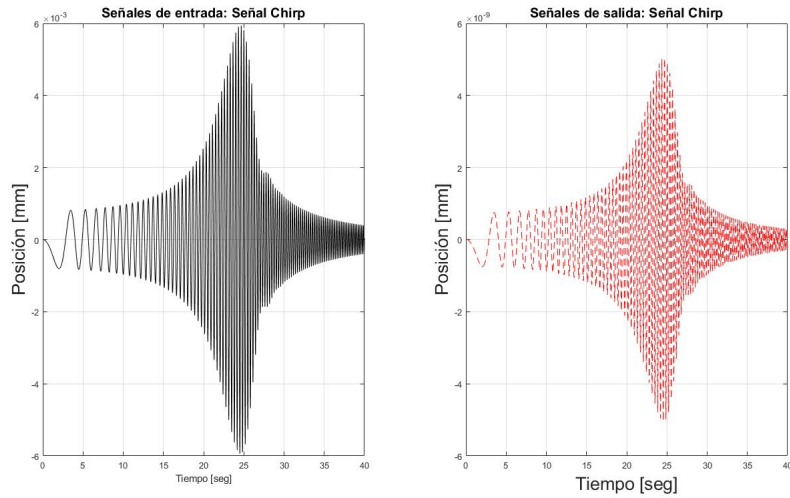


Figura 3.4: Respuesta del actuador ante una una señal de barrido sinusoidal (chirp)

Como se puede observar en la Figura 3.4, así como en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7, la señal de entrada es 10^6 veces mayor que la señal de salida. Esta respuesta es esperable puesto que la planta no ha sido controlada y por consecuencia se tiene una señal de salida baja y con error; por esta razón, la implementación de un controlador se vuelve indispensable para que la

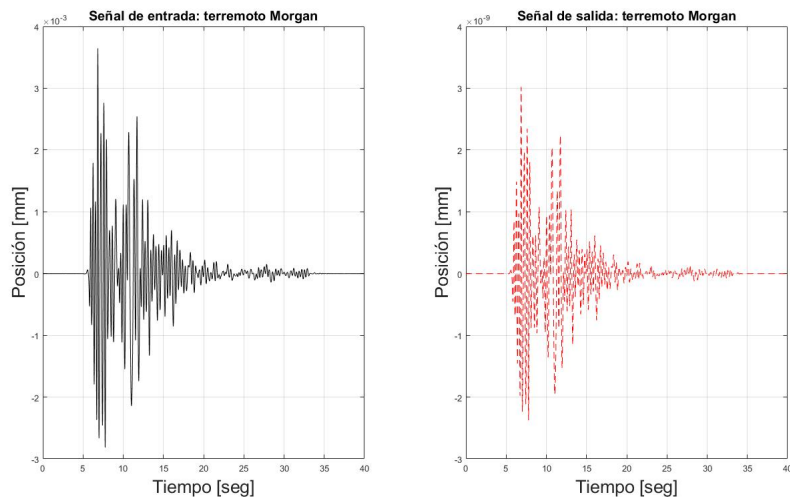


Figura 3.5: Respuesta del actuador ante terremoto Morgan

señal de salida pueda ser utilizada, volviendo una necesidad la implementación de un controlador. De tal manera como se determinó en el capítulo 2, se utilizó un controlador PID para controlar la planta lo mejor posible. Cabe recalcar que un controlador PID es uno de los más usado por

su facilidad de implementación y su versatilidad en el funcionamiento de la planta, permite desarrollar plantas controladas estables, aunque hay casos, también, en los que el controlador no llega a ser lo suficientemente robusto para controlar la planta, pero esos controladores son muy complejos y requieren de mayor estudio para su comprensión y aplicación.

Como se muestra en las Figura 3.5, Figura 3.6 y Figura 3.7, todas presentan el mismo error, la falta de control en la planta, pero no inestabilidad, lo cual indica que la planta sin controlar no es inestable.

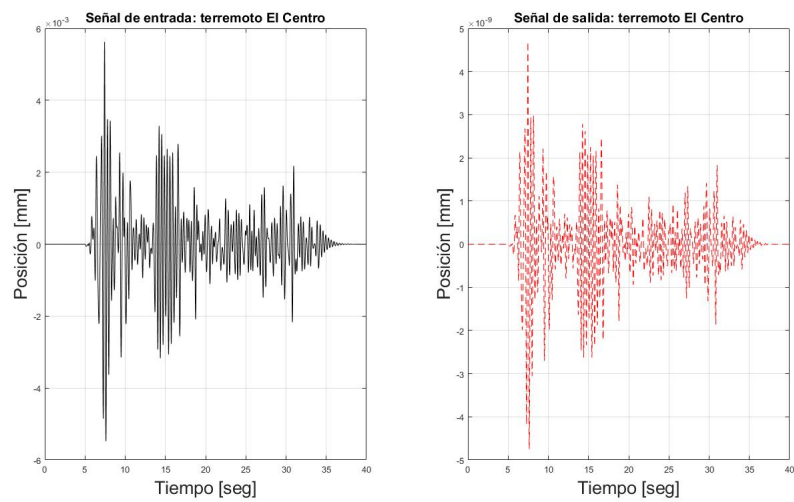


Figura 3.6: Respuesta del actuador ante terremoto El Centro

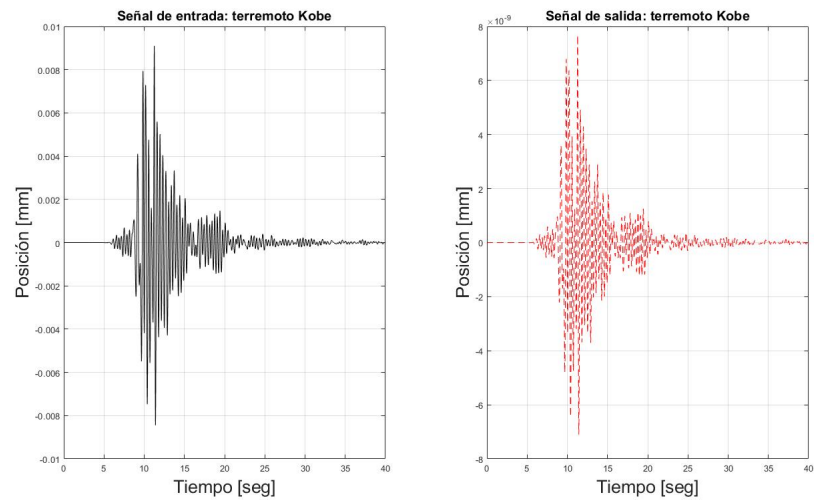


Figura 3.7: Respuesta del actuador ante terremoto Kobe.

3.3 Análisis del sistema de control con el controlador PID

Para controlar la planta, se utilizó un controlador PID como se mencionó en el capítulo anterior. Cabe mencionar que el controlador solo tendrá constante proporcional K_p , la cual depende del error presente y, por consecuencia, lo ayuda a reducir dicho error; y constante k_i la cual depende de errores pasados, además de que ayuda a reducir el error en estado estacionario. Para el caso de la componente K_d no se la aplicó ya que esta tiende a amplificar el ruido a alta frecuencia que pueden hacer inestable al sistema, por dicha razón solo será un controlador proporcional integral.

Para sintonizar la planta de control se utilizará el método de sintonización de Ziegler-Nichols, el cual es un método experimental que permite obtener los valores de K_p , K_i y K_d .

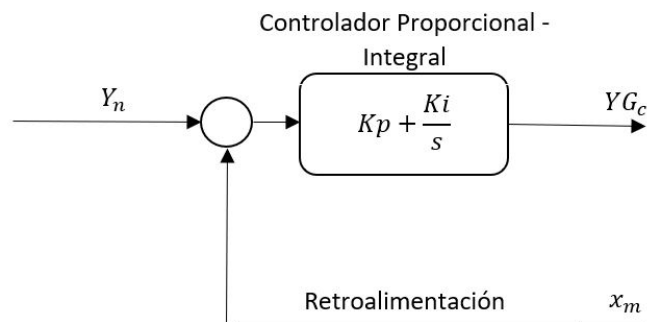


Figura 3.8: Distribución del controlador PI

Tabla 3.2: Parámetros del controlador por método de sintonización de método de Ziegler-Nichols

	K_p	K_i	K_d
P	3.4703×10^6	0	0
PI	3.1232×10^6	1.4292×10^8	0
PID	4.1643×10^6	2.8583×10^8	15167

En la tabla 3.2 se muestran los valores de las constantes obtenidas para el caso de un controlador P, PI y PID. Una vez determinado los parámetros, se realizaron pruebas en la planta para cada caso, pero en todas se obtuvo la misma respuesta.

Como se puede observar en la Tabla 3.3, para todos los casos, la planta se vuelve inestable, y esto ocurre ya que el método de Ziegler-Nichols es experimental y no siempre converge en valores deseados. Ya que no se

Tabla 3.3: Resultados de la planta del controlador por método de sintonización de método de Ziegler-Nichols

Controlador	Estabilidad
P	Inestable
PI	Inestable
PID	Inestable

logró estabilizar la planta, por lo que es necesario utilizar otra alternativa como lo es el PID tuner de MATLAB con el cual se alcanzó un mejor resultado pero no suficiente. Entre pruebas de ensayo y error, a través del Control System Design Toolbox, se consiguió un controlador con los parámetros mostrados en la tabla 3.4

Tabla 3.4: Parámetros finales del controlador PI

Constante proporcional K_p	Constante integral K_i
144000	5000000

Una vez que se observó que eran estables, se procedió a calcular su raíz cuadrada media normalizada (RMS) para el rastreo de error, como se mencionó en el capítulo anterior, para cada señal de entrada con la que se realizó la simulación.

Como se puede observar, todas las señales oscilan al rededor de 52 %, los cuales son valores buenos teniendo en cuenta como había comenzado la planta, pero en términos generales no son valores lo suficientemente buenos, además de los valores de RMS normalizada.

Tabla 3.5: Parámetro de raíz cuadrada media normalizada (RMS) para planta controlada con PI

Señal	J1
Terremoto El Centro	52.16 %
Terremoto Kobe	51.63 %
Terremoto Morgan	52.30 %
Señal Chirp	52.79 %

En las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11, se observa que la señal de entrada no logra seguir a la señal de salida, principalmente, en las secciones de la curva donde existen picos que es donde más se pierde el control. Tanto los valores de RMS y la inspección visual de la gráfica ayuda a determinar que el controlador PI no controla la señal como se desea, principalmente, en las señales donde hay mayores picos como en la producida por el terremoto

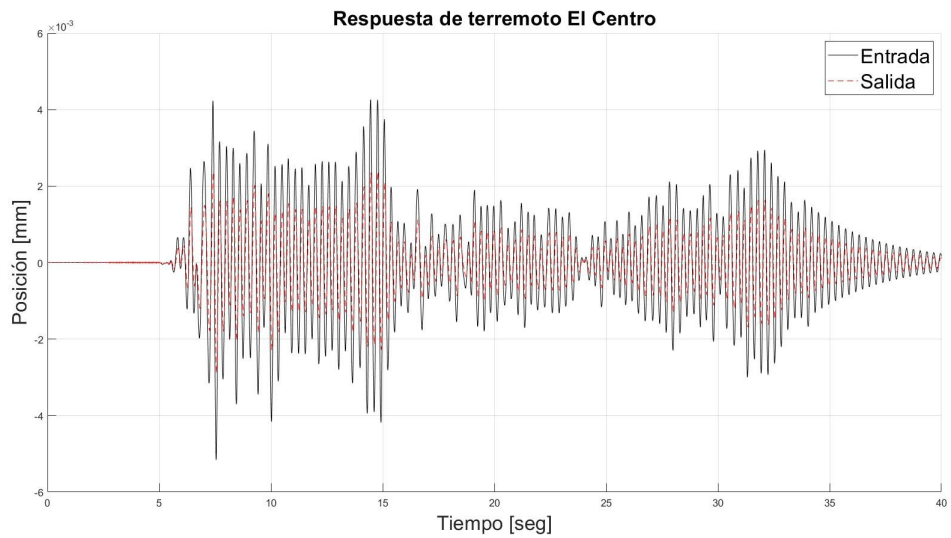


Figura 3.9: Seguimiento del actuador con controlador PID: terremoto El Centro

Morgan Figura 3.11. En el caso de la señal Chirp es una señal un poco especial ya que modula la frecuencia en función del tiempo y, como un actuador por naturaleza es un pasa bajos, no trabaja bien a altas frecuencias, por esa razón, es la señal con un mayor porcentaje de error.

Por último, se puede concluir que para esta planta el Controlador PID no es la mejor opción ya que no permite darle un buen control a la planta. Aunque si se logra la estabilidad, sus parámetros en estado transiente no son los deseados y de acuerdo a trabajos revisados lo ideal es que llegue a un 30% para que sea considerado un controlador aceptable.

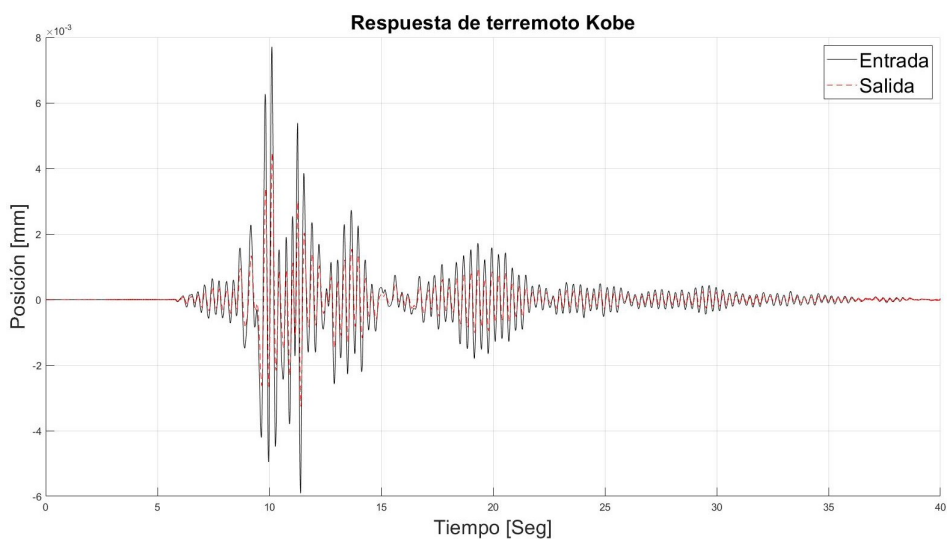


Figura 3.10: Seguimiento del actuador con controlador PID: terremoto Kobe

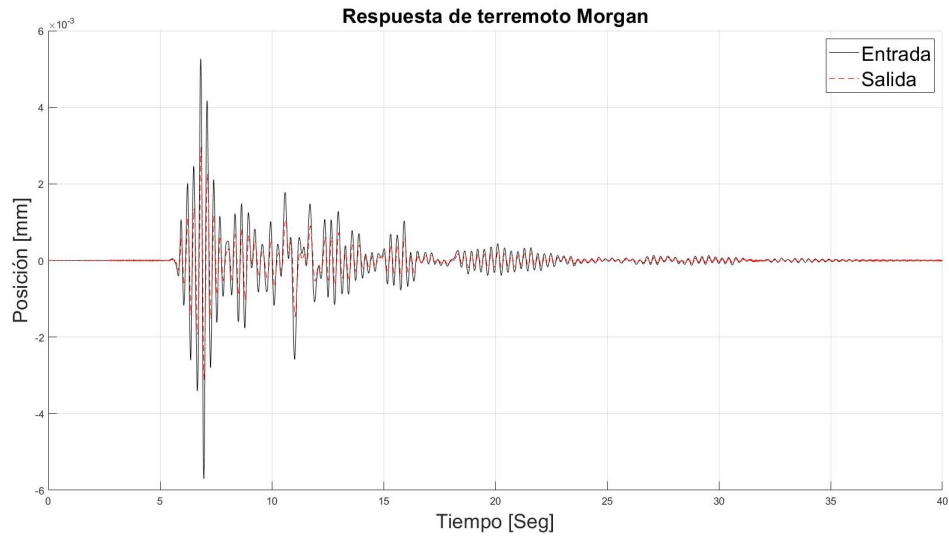


Figura 3.11: Seguimiento del actuador con controlador PID: terremoto Morgan

3.4 Análisis del controlador PID y compensador de adelanto de fase

Posteriormente a la implementación del controlador PI, se debe implementar el compensador como se describió en el capítulo anterior, el cual debe ir justo antes de la retroalimentación del controlador como se muestra en la Figura 3.12.

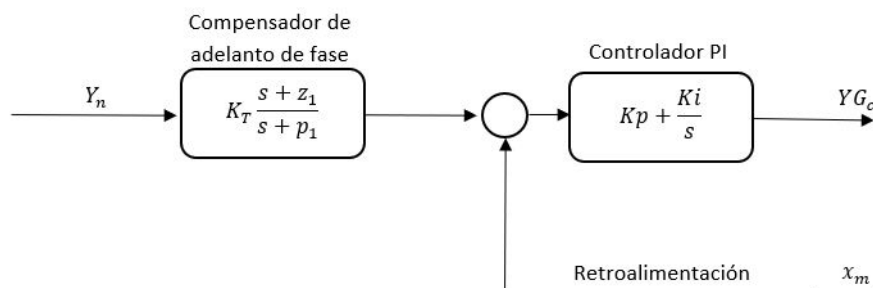


Figura 3.12: Diagrama de bloques del compensador

Una vez que se realizaron los cálculos correspondientes detallados en el capítulo 2, se determina la los parámetros finales del controlador.

Tabla 3.6: Parámetros finales del compensador de adelanto de fase

K_T	z_1	p_1
1013	4.443	4501

Con los valores obtenidos se realizó los ensayos para determinar el tiempo de retraso, con la planta sola, la planta con el controlador y la planta con el

controlador y compensador, como se muestra en la Figura 3.13.

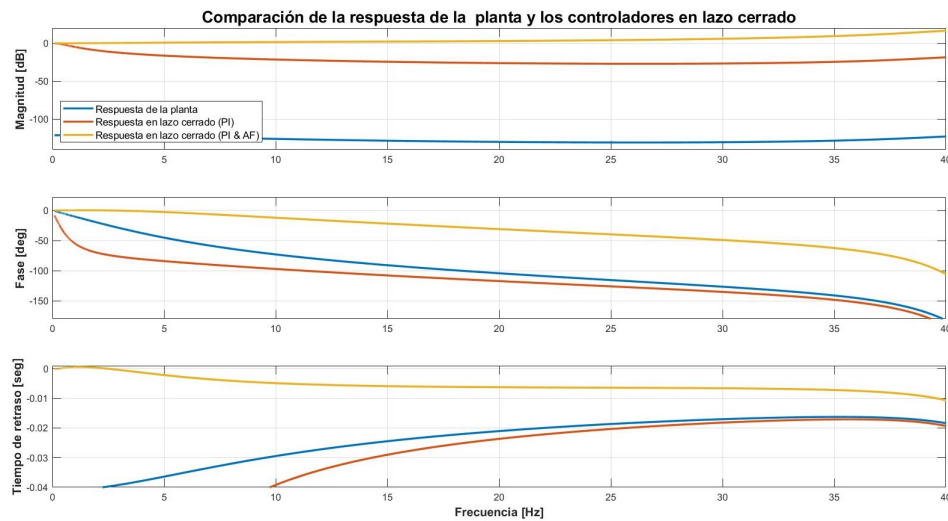


Figura 3.13: Comparación de las respuestas de la planta y los controladores en lazo cerrado

De las gráficas de la figura 3.13 se puede observar que para el diagrama de magnitud la ganancia es mayor en la respuesta compensada, y la menor es la planta sola, esto se debe a que tanto el controlador como el compensador le imponen una ganancia que se ve representada en la magnitud en el caso del controlador el K_p y en el compensador el K_T . Para el caso de la fase de la planta es normal que vaya decayendo en función de la frecuencia ya que mientras más rápida sea la señal de entrada mayor será el desfase, por eso cuando se le coloca el compensador, se puede observar que presenta un aumento de fase lo que, términos del tiempo de retraso, es un tiempo de retraso menor, logrando llegar del 33.2 mseg a 3.6 mseg.

3.5 Análisis del sistema de control con el controlador LQG

La función de transferencia de la planta se convierte en espacio de estados cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 3.14.

Como se mencionó en el capítulo 2, el controlador LQR permite optimizar la ubicación de los polos para obtener una respuesta deseada. Esta optimización es posible con el parámetro J y las matrices de peso Q y R que corresponde a las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7, respectivamente. Utilizando el comando de matlab de la ecuación 2.8 se puede hallar la matriz de ganancia K que permitirá que cada una de las variables de estado sean retroalimentadas para que se pueda ubicar los polos en lazo cerrado en una ubicación que sea óptima, es decir, que la respuesta de la planta tenga el mejor tiempo de estabilización, tiempo de levantamiento y overshoot.

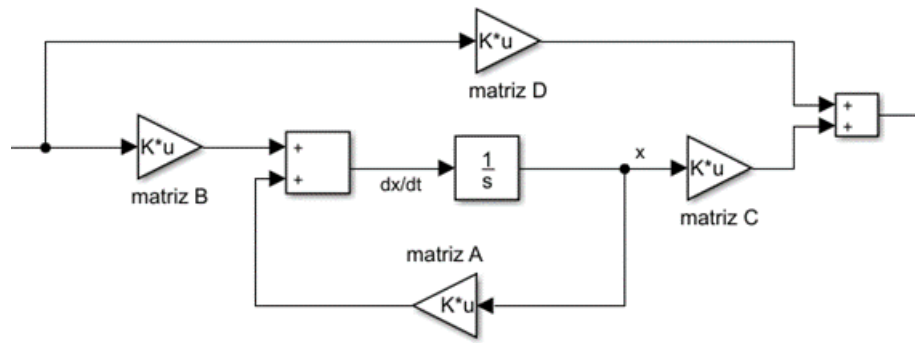


Figura 3.14: Espacio de estados de la planta de control

Tabla 3.7: Parámetro de raíz cuadrada media normalizada (RMS) para planta controlada con LQR

Señal	J1
Terremoto El Centro	33.08 %
Terremoto Kobe	32.94 %
Terremoto Morgan	33.35 %
Señal Chirp	33.30 %

El vector de ganancia K se muestra en la ecuación 3.8.

$$K = [2994480 \quad 141420 \quad 159800 \quad 100000] \quad (3.8)$$

Cuando se implementa el vector de ganancia K en el controlador LQR obtenemos resultados no satisfactorios. Por esto surge la necesidad de incluir una ganancia extra K_r entre la salida de la subestructura numérica y la entrada de la subestructura experimental, procedimiento válido cuando se trabaja este tipo de controladores ya que esto permite reducir el error en estado estacionario. La ganancia K_r es como sigue en la ecuación 3.9.

$$K_r = 1000000 \quad (3.9)$$

La señal de entrada y salida de la planta de control con el controlador LQR no puede realizar el rastreo de posición de manera precisa. Para evaluar este controlador, también se usó el criterio de evaluación de la raíz cuadrada media normalizada (RMS) del error de seguimiento de posición que se muestra en la tabla 3.7. El porcentaje de error, como se puede observar, es menor que usando un controlador PID. El error se reduce desde aproximadamente un 50% utilizando un controlador PID hasta un 30% utilizando un controlador LQR.

La principal razón de que el RMS sea elevado se debe a que en este proyecto se utilizó una planta que fue identificada y se obtuvo valores que se ajustaron para darle un significado físico.

3.6 Análisis del controlador LQR y compensador de adelanto de fase

Así como se realizó en la sección 3.4, se implementó un compensador para reducir el tiempo de retraso de las señales. El compensador es una función de transferencia que consta de un cero y un polo al cual se le añade una ganancia. En la figura 3.12 se muestra esta función de transferencia y en la tabla 3.8 se indica los parámetros del compensador.

Tabla 3.8: Parámetros finales del compensador de adelanto de fase

K_T	z_1	p_1
130	100.238	9000

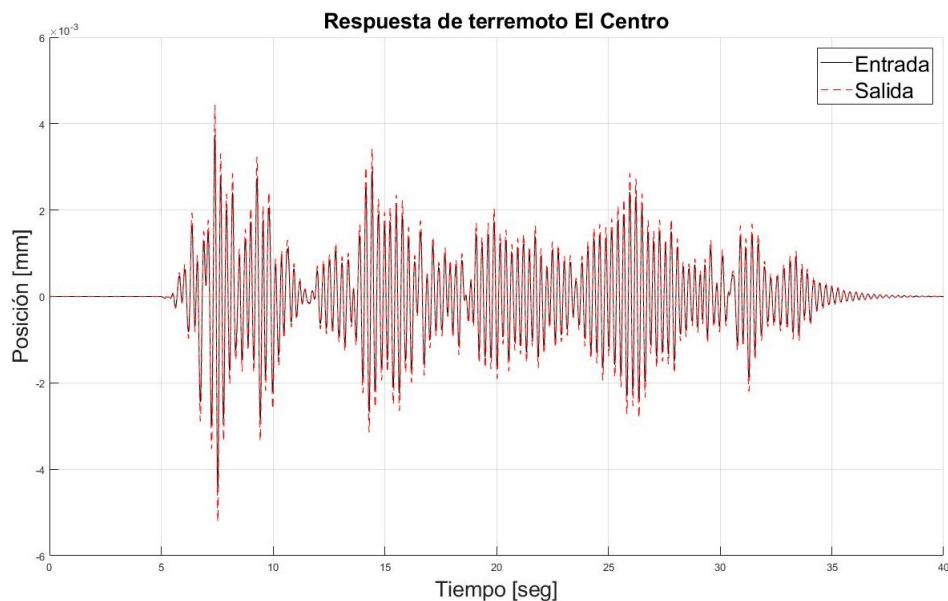


Figura 3.15: Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: terremoto El Centro

El tiempo de retraso de la planta sin controlador ni compensador es de 40 ms. Una vez implementado el controlador, se pudo reducir el error en estado estacionario y mejorar las características transientes del sistema y, además, mejorar el tiempo de retraso a 20 ms. Sin embargo, un tiempo adecuado de tiempo de retraso es de 5 ms. Este tiempo de retraso es al que se desea llegar ya que se utilizó la subestructura del autor Silva et. al. (Silva y cols., 2020).

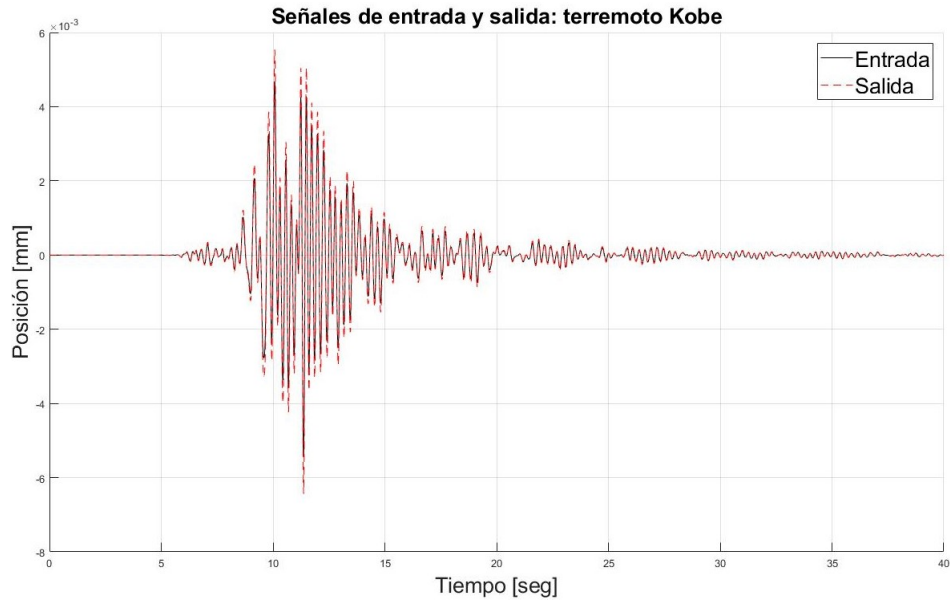


Figura 3.16: Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: terremoto Kobe

Se explica que se elige un tiempo de retraso de 5 ms porque, debido a como se particionó la estructura, el tiempo de retraso tiene que tener un valor mínimo para evitar una mayor desincronización entre ambas subestructuras.

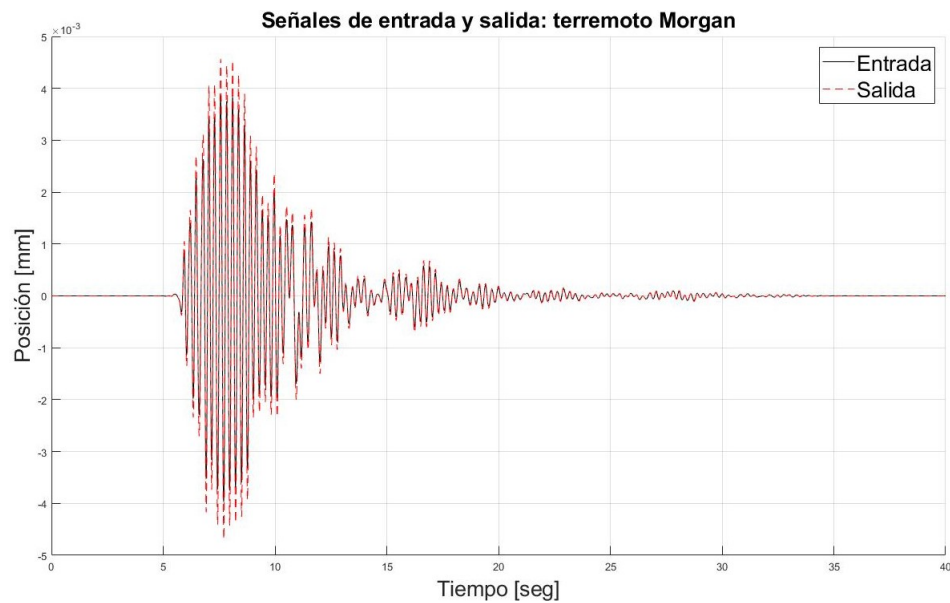


Figura 3.17: Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: terremoto Morgan

La gráfica 3.19 muestra como se mejoró el tiempo de retraso hasta un valor de 5 ms cuando se implementó el compensador junto con el controlador

LQR.

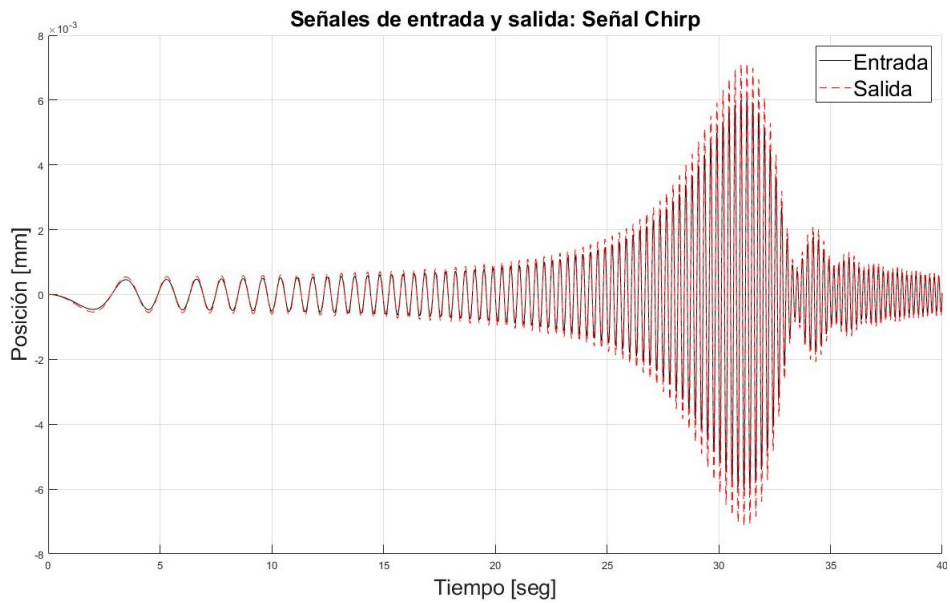


Figura 3.18: Seguimiento del actuador con controlador LQR y compensador: señal chirp

Además de mejorar el tiempo de retraso, las figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18 muestran como la diferencia entre las señales es menor cuando se le implementó el compensador. En la tabla 3.9 se muestra que el valor de la raíz cuadrada media normalizada es de alrededor de 20 % para cada uno de los terremotos.

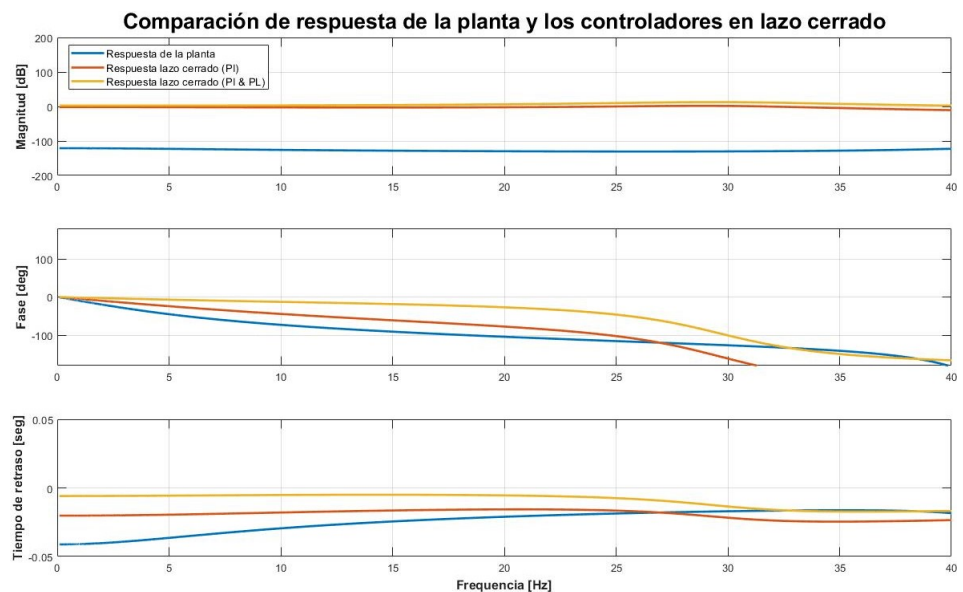


Figura 3.19: Comparación de las respuestas de la planta y el controlador LQR en lazo cerrado

Tabla 3.9: Parámetro de raíz cuadrada media normalizada (RMS) para planta controlada con LQR

Señal	J1
Terremoto El Centro	20.68 %
Terremoto Kobe	20.63 %
Terremoto Morgan	20.77 %
Señal Chirp	20.73 %

3.7 Análisis de costos

El proyecto es desarrollado de manera virtual, por lo tanto todos sus costos están asociados únicamente a los equipos computacionales y de mano de obra, a demás de las conexión a internet y los equipos de adquisición de datos como se detalla en la tabla 3.10 y en la tabla 3.11.

Adicionalmente se calculan los costos que corresponden a el trabajo Ingenieril, por el tiempo que duró el desarrollo del proyecto.

Por lo que suma de tanto los equipos y el trabajo ingenieril supone un costo total de proyecto de \$ 26700.00 Dolares americanos.

Por último, el costo de mantenimiento y funcionamiento de los equipos esta principalmente relacionado con el costo de renovación de licencias, entre otros como se detalla en la Tabla 3.12.

Se puede notar que los gastos de mantenimiento y funcionamiento del equipo son caros debido a la renovación anual de las licencias; una alternativa para reducir los costos sería que se comprara la licencia de por vida, si bien representa un gasto inicial muy alto, aproximadamente en 3 años se empezarían a ver diferencias en cuento a costos de mantenimiento ya que estos se reducirían en un 80% del valor que se pagaría si la renovación de las licencias se realizaría anualmente.

Tabla 3.10: Costos de equipos e instrumentos

Descripción	Características	Costo	Cantidad	Total
Software	MATLAB	\$ 940.00	2	\$ 1 880.00
Software	Simulink	\$ 1 420.00	2	\$ 2 840.00
Software	Control system toolbox	\$ 540.00	2	\$ 1080.00
Software	Simulink Control design	\$ 540	2	\$ 1080.00
Software	System Identification toolbox	\$ 540	2	\$ 1080.00
CPU	CPU con 16 Gb de RAM y procesador Core Intel i5	\$ 559.00	2	\$1 118.00
Router	Enrutador WiFi inteligente de 5 GHz con banda dual Gigabit para Internet	\$ 60.00	2	\$ 120.00
Conexión a Internet	Conexión a internet por fibra óptica de 50 Mbps	\$ 38.19	6	\$ 229.14
Cableado eléctrico	Cables de conexión entre equipos e instrumentos	\$ 250.00	1	\$ 250.00
Monitor	Monitor LG LED de 24 pulgadas	\$ 129.99	2	\$ 259.98
Tarjeta de adquisición de datos	Tarjeta de adquisición de datos para cada equipo National Instruments	\$ 2 500.00	2	\$ 5 000.00
Total				\$ 14 877.12

Tabla 3.11: Costo de mano de obra ingenieril

Descripción	Características	Costo	Cantidad	Meses de trabajo	Total
Trabajo Ingenieril	Ingenieros encargados de el diseño y desarrollo del proyecto	\$1 000.00	2	6	\$12 000.00

Tabla 3.12: Costos de mantenimiento y funcionamiento del proyecto

Descripción	Características	Costo	Cantidad	Veces requerido al año	Total
Renovación de licencia	Matlab	\$940.00	2	1	1 880.00
Renovación de licencia	Simulink	\$1 420.00	2	1	\$2 840.00
Internet	Plan mensual de internet 50 Mbps	\$38.19	1	12	\$458.28.00
Mantenimiento	Mantenimiento preventivo de los equipos	\$61.99	1	12	\$743.86
Total					\$ 5 922.14

3.8 Análisis de resultados

En las secciones anteriores del capítulo fueron redactados todos los valores y parámetros requeridos para la realización de la Simulación híbrida, desde el diseño del actuador, el modelado de la estructura y el parámetros con los que se midieron las respuestas, pero con dos diferentes controladores y compensadores, los mismos que presentaron sus diferencias en cuanto a los parámetros con los que fueron medidos, en la Tabla 3.13 se detallan los

Tabla 3.13: Comparación de resultados con los diferentes controladores

Señal	LQR y compensador	PI y compensador
Terremoto El Centro	20.68 %	52.16 %
Terremoto Kobe	20.63 %	51.63 %
Terremoto Morgan	20.77 %	52.30 %
Señal Chirp	20.73 %	52.16 %
Tiempo de retraso	a 5.9 mseg	3.9 mseg

resultados de desempeño para el caso del controlador LQR y el PI, ambos con el compensador de adelanto de fase.

Los porcentaje de RMS para ambos casos siguen el mismo orden: Kobe, El Centro, Chirp y Morgan. La señal del terremoto Kobe es presenta menos picos, por otro lado la señal del terremoto Morgan llega a las mas altas amplitudes y por un mayor periodo de tiempo.

Comparando el desempeño entre controladores, el que presentó una mayor eficacia fue el controlador LQR, esto tiene sentido ya que el controlador LQR es mucho más robusto, y por lo tanto permite volver mas rápido al sistema y mas estable.

Por último, el tiempo de retraso fue mayor en el LQR, a pesar de haber tenido un mejor seguimiento de la señal, aunque la diferencia con el PID no fue mayor, esto se debe a la simplicidad de PID y su fácil acople con un compensador de adelanto de fase, ya que ambos son desarrollados con funciones de transferencia, por otro lado, el LQR se desarrolla mediante espacios de estado y como el compensador no, es una limitante para el desarrollo entre ambos. Como un análisis general se podría decir que la planta con el controlador LQR y el compensador de atraso son la mejor opción para el desarrollo del mismo.

La planta Identificada para el actuador tiene un modelo similar en cuanto a cantidad de polos y ceros con el que desarrolló el Dr. Margareh, cuenta con

un polo para el actuador, un polo para la servo-válvula, un cero para la retroalimentación natural de velocidad y una retroalimentación natural de posición.(Maghareh, Silva, y Dyke, 2018) De acuerdo con el trabajo de Silva et. al el cual utiliza un PID y un compensador de adelanto, consigue respuestas mucho mejores que las presentadas en el proyecto, en cuanto al seguimiento de la señal, esto es ya que la planta en su caso fue diseñada a partir de magnitudes físicas y no identificada, pero esto es posible ya que cuentan con el equipo físico que les permitió realizar los cálculos pertinentes para obtener una planta mas estable, por otra parte él describe cuatro casos con cambios en la partición de la subestructura numérica mientras que aquí solo se analizó un caso de partición en particular, por otra parte en cuanto el tiempo de retraso, en este proyecto se presento un compensador que logra reducirlo a 3.6 mseg, 1 mseg menos que en el benchamark.

Además, se hace hincapié en que a pesar de que el error sigue siendo considerable en el controlador LQR, si hubo una mejora al controlar la planta. Wu et al. (Wu, Yin, y Zhang, 2010) utilizó precisamente este tipo de controlador debido a que era superior al controlador PID y muestra esto a través de simulaciones numéricas, pero además del controlador LQR también le añadió un filtro de Kalman con el que se puede eliminar con mayor rapidez el error entre las señales y tener una mejor precisión. A este controlador se lo conoce como LQG (Tao, 2010). Por otro lado, Huimeng et. al, también eligió utilizar un controlador LQR junto con un filtro de Kalman, pero, además, propone una metodología desarrollada por Doyle et. al (Doyle y Stein, 1981) llamada Loop Transfer Recovery (LTR) que ayudaría a mejorar la precisión del rastreo de posición (Zhou, Xu, Shao, Ning, y Wang, 2019).

El compensador de adelanto de fase permitió que, junto con el controlador LQR, se pudiera obtener resultados más satisfactorios llegando hasta un error de solo el 20%. El compensador es un elemento que no puede eliminarse cuando se realiza este tipo de experimento virtual porque no solo disminuye el tiempo de retraso, sino que también permite que se disminuya el error de rastreo de posición en el sistema. Para el compensador se puede realizar un diseño simple en donde se ubiquen polos y ceros y una ganancia que es lo que se realizó en este trabajo, sin embargo, también se podría haber realizado otros tipos de procedimientos. Todos los métodos que se pueden utilizar para poder diseñar un compensador pueden ser divididos en dos grandes grupos, cuando se considera compensar el tiempo de retraso de manera constante y cuando se compensa tomando en cuenta que este se

debe adaptar al tiempo de retraso. Cuando se toma en cuenta el tiempo de retraso constante, como en el caso de este trabajo, el desempeño de ese compensador dependerá de la precisión del sistema de control del experimento virtual. Autores como Carrion et al. (Carrion y Spencer, 2006), Horiuchi et al. (Horiuchi, Inoue, Konno, y Namita, 1999) entre otros, propusieron diseños de compensación del primer grupo de métodos obteniendo resultados con menor tiempo de retraso y mayor precisión del rastreo de posición, pero que se debía modelar el sistema y hallar el tiempo de retraso a priori para realizar el diseño del compensador. Por otro lado, otros autores proponen compensadores del segundo grupo de métodos. Por ejemplo, Weijie Xu et al. (Xu, Chen, Guo, y Chen, 2019) propone un compensador denominado FEI en donde el compensador se adapta al tiempo de retraso y no habría que calcular este valor con anterioridad. Por otro lado, HongWei Li et al. (Li y cols., 2021) propone no solo el uso de un compensador y un controlador, que incluye un filtro de Kalman, sino que además demuestra que una planta de control de menor orden con incertidumbres puede reemplazar a una planta de orden superior sin perder desempeño y robustez; de hecho, Hongwei Li et al. redujo la planta de control de Silva et al. de orden cinco a una planta de orden dos y obtuvo mejores resultados.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se diseñó una herramienta de simulación híbrida con todas las fases que lo compone. Esta herramienta cuenta la subestructura numérica, la subestructura experimental junto con la planta de control, el controlador y sensores para medir las variables deseadas.
- El controlador LQR fue diseñado encontrando los valores óptimos de la variable K, que indica a donde se moverán los polos de lazo cerrado del sistema. Los resultados muestran que al realizar este procedimiento, el rastreo de posición no es tan preciso como se planteó inicialmente.
- Además del controlador LQR se diseñó otro controlador para verificar si se obtenían mejores resultados. En este caso, el controlador diseñado fue un tipo PID, sin embargo, los resultados no fueron los esperados. Esto se debe a que el controlador LQR modifica todas las variables de estado del sistema para encontrar la ubicación óptima de los polos en lazo cerrado. En contraste, el PID solo permite modificar un cero para intentar llegar a la respuesta deseada.
- El controlador PID fue sintonizado mediante diferentes métodos para. Se utilizó la herramienta de MATLAB llamada Sisotool para poder observar como responde el sistema al mover los polos de lazo cerrado. También, se utilizó la herramienta Tune de Simulink, con la que se puede observar la respuesta ante una entrada unitaria del sistema, pero a diferencia de Sisotool, en Tune modifica la respuesta transiente y la estacionaria directamente.
- El controlador LQR es mejor que un controlador PID ya que produce un comportamiento más robusto y eficiente, pero tiene un proceso de implementación mucho más complejo, que requiere de cambios a espacios de estado, y un conocimiento más profundo de las variables de la planta.

4.2 Recomendaciones

- Como uno de los factores que influye en la simulación híbrida es el modelado del actuador, se recomienda que el modelado no se lo realice con una identificación de sistemas ya que al realizar este procedimiento, los valores obtenidos no tienen un significado físico. Al realizar los experimentos para obtener los datos y, posteriormente, identificar el

sistema, los resultados son asignados a un dato físico cuando hay que tomar en cuenta que al medir, no se puede aislar el sistema en su totalidad. Lo recomendable sería modelar un actuador con parámetros físicos e identificar el sistema solo para obtener ciertos parámetros que deben ser medidos.

- Implementar otros tipos de controladores para poder obtener una mejor respuesta y reducir la diferencia entre la señal de salida de la subestructura numérica y la de entrada de la subestructura experimental.
- Utilizar la planta con controlador LQR y compensador, para un mejor desempeño de actuador.
- Para este proyecto se utilizó solo un actuador. En el caso de querer analizar estructuras más complejas, se puede necesitar de más actuadores. Se recomienda que si la estructura se particiona y esta partición tiene más de un piso, se utilice actuadores para mover todos los pisos.
- Se recomienda utilizar diferentes métodos de control para obtener mejores resultados. Los resultados obtenidos en este trabajo tienen todavía un error considerable.
- Se recomienda que para poder mejorar aún más la precisión del experimento virtual se podría utilizar el filtro de Kalman para poder observar todos los estados, sobre todo aquellas variables que no se puedan medir.

BIBLIOGRAFÍA

- Carrion, J. E., y Spencer, B. (2006). Real-time hybrid testing using model-based delay compensation. En *Proceedings of the 4th international conference on earthquake engineering* (Vol. 299).
- Carrion, J. E., Spencer, B., y Phillips, B. M. (2009). Real-time hybrid simulation for structural control performance assessment. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(4), 481–492.
- Doyle, J., y Stein, G. (1981). Multivariable feedback design: Concepts for a classical/modern synthesis. *IEEE transactions on Automatic Control*, 26(1), 4–16.
- Horiuchi, T., Inoue, M., Konno, T., y Namita, Y. (1999). Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28(10), 1121–1141.
- Li, H., Maghareh, A., Montoya, H., Uribe, J. W. C., Dyke, S. J., y Xu, Z. (2021). Sliding mode control design for the benchmark problem in real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 151, 107364.
- Maghareh, A., Silva, C. E., y Dyke, S. J. (2018). Parametric model of servo-hydraulic actuator coupled with a nonlinear system: Experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 663–672.
- Matlab, S. (2020). Matlab. *The MathWorks, Natick, MA*.
- Mera Muñoz, D. (2021). Client-server application for multi-platform coordination on real-time hybrid simulation testing. *17WCEE 17th world conference on earthquake engineering*, 106381.
- Nakashima, M., Kato, H., y Takaoka, E. (1992). Development of real-time pseudo dynamic testing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21(1), 79–92.
- Nise, N. S. (2020). *Control systems engineering*. John Wiley & Sons.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering*. Prentice hall.
- Schellenberg, A., y Mahin, S. (2006). Integration of hybrid simulation within the general-purpose computational framework opensees. En *Eighth us national conference on earthquake engineering* (pp. 1–10).
- Silva, C. E., Gomez, D., Maghareh, A., Dyke, S. J., y Spencer Jr, B. F. (2020). Benchmark control problem for real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 135, 106381.
- Tao, Z. (2010). Numerical model of loading system for real-time substructure testing. *Journal of the Harbin Institute of Technology*.
- Wu, B., Yin, Q.-L., y Zhang, T. (2010). Numerical model of loading system for real-time substructure testing. *Harbin Gongye Daxue Xuebao(Journal of Harbin Institute of Technology)*, 42(12), 1855–1859.

- Xu, W., Chen, C., Guo, T., y Chen, M. (2019). Evaluation of frequency evaluation index based compensation for benchmark study in real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 130, 649–663.
- Zhou, H., Xu, D., Shao, X., Ning, X., y Wang, T. (2019). A robust linear-quadratic-gaussian controller for the real-time hybrid simulation on a benchmark problem. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133, 106260. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019304753> doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106260>

APÉNDICES

APÉNDICE A

Para la partición de la subestructura numérica se realizó el mismo procedimiento que el autor Silva et. al. Para la partición de la subestructura se considera que la masa de todos los pisos, así como también el coeficiente de amortiguamiento, son iguales. En la tabla 4.1 se detalla todos los valores que se consideró para la partición de la subestructura.

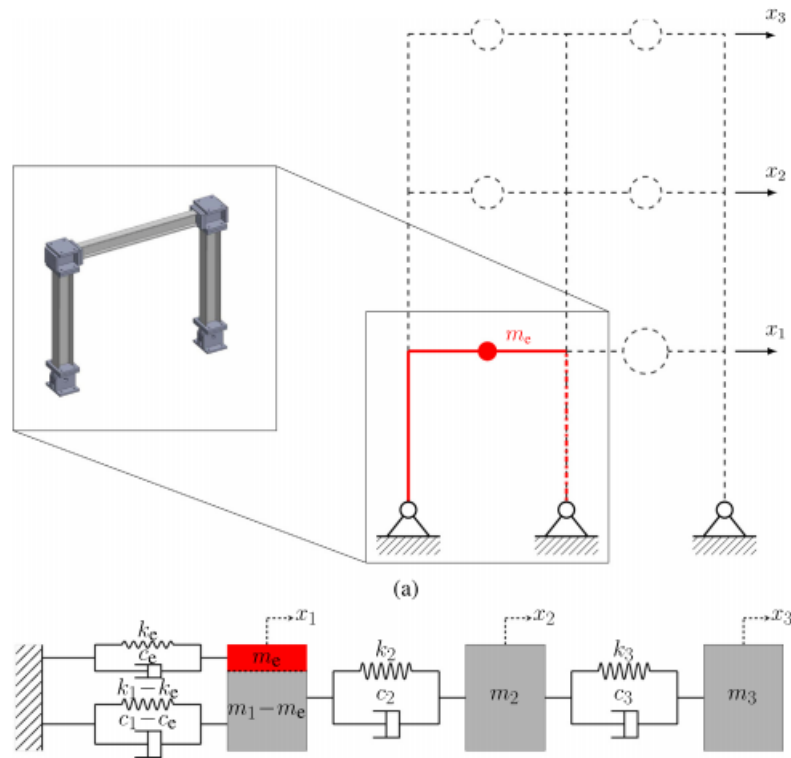


Figura 4.1: Partición de la subestructura numérica (Silva y cols., 2020)

Tabla 4.1: parámetros para la partición de la subestructura numérica

Masa de piso	amortiguación	m_e	k_e	c_e
1000 kg	5 %	29.1	1.19×10^6	114.6

APÉNDICE B

A continuación, se presenta los diagramas de bloques de la planta de control junto con dos distintos controladores, el controlador PID y el controlador LQR, cada uno con con su respectivo compensador.

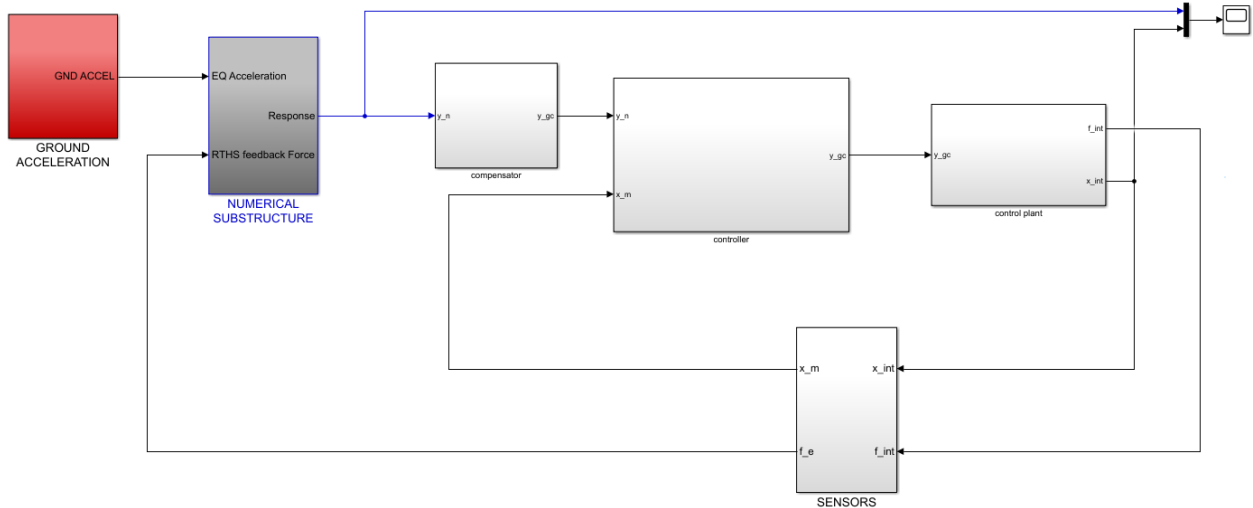


Figura 4.2: Diagrama de bloques de la planta de control con controlador PID y compensador

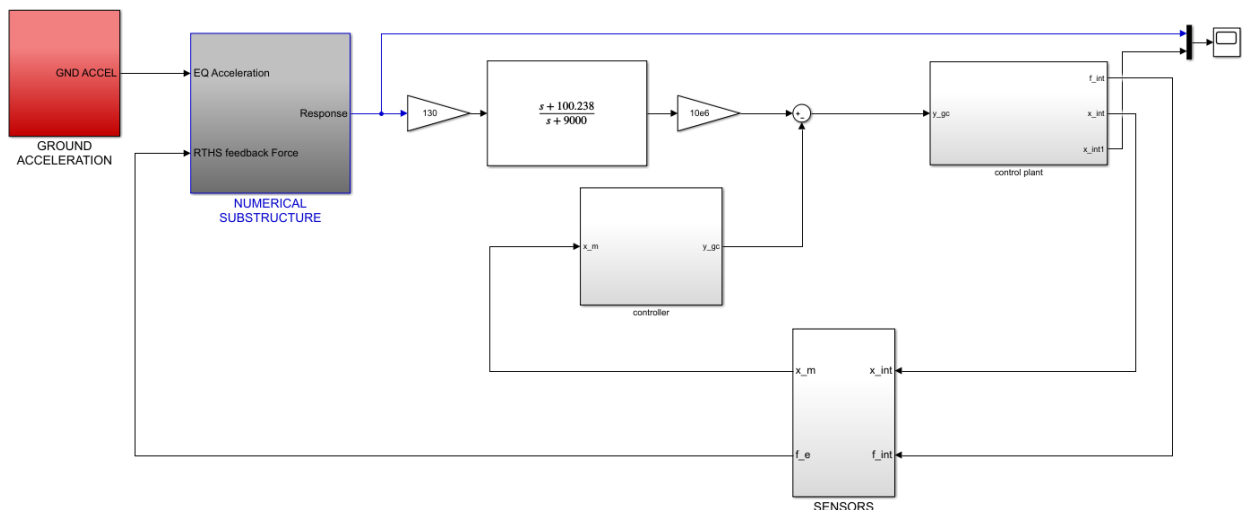


Figura 4.3: Diagrama de bloques de la planta de control con controlador LQR y compensador