

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



DISEÑO DE CONTROL EN CASCADA UTILIZANDO
MATLAB PARA UN SISTEMA
ELECTROHIDRÁULICO SÍSMICO UNIAXIAL

TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADA POR:

Bach. GONZÁLES LÉVANO, JUAN CARLOS MIGUEL
ANGEL

Bach. LEÓN SIGÜEÑAS, GABRIEL ALONSO

Asesor: Dr. Ing. PEDRO FREDDY HUAMANÍ NAVARRETE

LIMA-PERÚ

2019

DEDICATORIA:

A mi familia y a Fiorella Cuya por todo su apoyo brindado en todos estos años de desenvolvimiento profesional, que este sea el primer paso, que doy en este amplio mundo de la investigación, los cuales me han permitido fortalecer mis conocimientos y virtudes.

Gabriel Alonso León Sigüeñas

DEDICATORIA:

Dedicado a la principal razón de este logro, mi madre Emilia Julia Lévano Guillen; que, sin su apoyo y comprensión, no hubiera logrado este primer peldaño que doy en mi vida profesional. A su vez dedico este trabajo a mis abuelos Alejandro Lévano Aburto y Emilia Augusta Guillen de Lévano, por sus sabios consejos, esos que me guiaron y encaminaron por el buen sendero y que hoy, nos han reunido en esta sala. A mis tíos Alejandro Lévano Guillen y a Margarita Lévano Guillen por apoyarme siempre, de una manera u otra, por estar siempre atrás para que sea el mejor en lo que realice, por más humilde que sea, a todos mis primos, por su apoyo incondicional de todos los días. A mis sobrinos a quienes quiero con todo el corazón y a Estefany Farías, por empujarme día a día, con sus palabras de aliento.

Juan Carlos Miguel Ángel Gonzáles Lévano

AGRADECIMIENTO:

Al Fondo Innóvate Perú, por permitirnos hacer realidad este proyecto de investigación, a través de su concurso de Investigación Aplicada 2015, del cual salimos ganadores y luego de 3 años vemos frutos de este trabajo.

A la Arquitecta María Teresa Méndez Landa por invitarnos a trabajar con el gran equipo de profesionales que conformamos este proyecto.

A la Universidad Ricardo Palma, por todo el apoyo brindado, permitiéndonos crecer como profesional a través de la investigación y el desarrollo de proyectos tecnológicos.

A nuestro asesor, el Dr. Pedro Freddy Huamaní Navarrete y al Ing. Héctor Gustavo Roselló Moreno, quienes nos apoyaron a lo largo del desarrollo de este proyecto, aportando sus conocimientos para el buen desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 2 |
| 1.1 Fundamentación y formulación del problema..... | 2 |
| 1.1.1 Problema Principal | 2 |
| 1.1.2 Problemas Secundarios..... | 2 |
| 1.2 Objetivos de la investigación | 2 |
| 1.2.1 Objetivo General | 2 |
| 1.2.2 Objetivos Secundarios | 2 |
| 1.3 Justificación de la investigación..... | 3 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1 Antecedentes de la investigación | 4 |
| 2.1.1 Soporte teórico de la investigación | 7 |
| 2.2 Definiciones conceptuales..... | 11 |
| 2.3.1 Sismo:..... | 11 |
| 2.3.2 Mesa Vibratoria | 11 |
| 2.3.3 Ingeniería Sismo-Resistente | 12 |
| CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR SÍSMICO | 14 |
| 3.1 Descripción General:..... | 14 |
| 3.2 Análisis del sistema de simulación sísmica: | 15 |
| 3.3 Parámetros de Diseño:..... | 15 |
| 3.3.1 Fuente de alimentación:..... | 16 |
| 3.3.2 Interfaz Software | 20 |
| 3.3.3 Controlador..... | 23 |
| 3.3.4 Actuadores | 24 |
| 3.3.5 Mecánicos y Cimentación | 25 |
| 3.3.6 Adquisición de Datos | 32 |
| 3.3.6.1 Sensores Ultrasonidos | 32 |
| 3.3.6.2 Sensores LVDT (Desplazamiento líneal)..... | 36 |
| 3.3.6.3 Transductores de Presión MBS 3050 – Danfoss..... | 40 |
| 3.3.6.4 Acelerómetros Honeywell..... | 41 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL, ELECTRÓNICO, HIDRÁULICO PARA EL SIMULADOR SÍSMICO | 44 |
| 4.1 Descripción del Sistema de Control..... | 44 |
| 4.2 Funcionamiento y configuración del sistema de control..... | 48 |
| 4.3 Descripción del Sistema Electrónico | 53 |
| 4.3.1 Alimentación del Arduino Mega 2560 | 53 |
| 4.3.2 Entorno de programación del Arduino | 54 |
| 4.3.3 Protocolos de Comunicación | 56 |
| 4.3.4 PLC Siemens S7 1200 | 58 |
| 4.4 Resultados del sistema de control | 59 |
| CONCLUSIONES | 63 |
| RECOMENDACIONES | 65 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 66 |
| Anexo N°1: Programación del Matlab – Guide | 67 |
| Anexo N°2: Hoja de Cálculos | 75 |
| Anexo N°3: Detalles de bomba hidráulica..... | 85 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura N°1: Diagrama esquemático de la mesa vibratoria | 4 |
| Figura N°2: Descripción de la configuración del sistema de control estructural | 6 |
| Figura N°3: Modelo simple del sistema del simulador sísmico | 8 |
| Figura N°4: Diagrama de bloques de servo-válvula – actuador – plataforma..... | 9 |
| Figura N°5: Diagrama de bloques de un simulador sísmico con realimentación por desplazamiento | 10 |
| Figura N°6: Esquema general de una mesa vibratoria..... | 12 |
| Figura N°7: Representación del diagrama de bloques de una mesa vibratoria. | 12 |
| Figura N°8 Tanque del aceite hidráulico alimentador del sistema de energía hidráulica | 17 |
| Figura N°9: Registro de los acelerógrafos instalados por el IGP alrededor del Perú..... | 20 |
| Figura N°10: Menú de Signal para la elección del registro sísmico, su descomposición en los cuadrantes para su recreación..... | 21 |
| Figura N°11: Menú principal de carga de parámetros e iniciación de pruebas | 22 |
| Figura N°12: Cuadro de registro de aceleración de los diferentes pisos de la estructura por ser evaluada | 23 |
| Figura N°13: Etapas de desarrollo de un sistema de control. | 24 |
| Figura N°14: Diseño del Pistón diferencial de doble vástago | 25 |
| Figura N°15: Componentes principales del simulador Sísmico | 26 |
| Figura N°16: Pistones hidráulicos, instalados en la loza de reacción..... | 27 |
| Figura N°17: Plataforma metálica del simulador sísmico | 28 |
| Figura N°18: Distribuciones de las vigas H, parte inferior de la plataforma..... | 28 |
| Figura N°19: Diseño de los rodamientos del sistema | 29 |
| Figura N°20: Vista principal de los rodamientos y sliders | 30 |
| Figura N°21: Ensayos de muros para encuentro de T invertido | 30 |
| Figura N°22: Ensayos de Muros para encuentros en “T” Horizontal..... | 31 |
| Figura N°23: Ensayos de módulos de 3.00m x 3.00m | 31 |
| Figura N°24: Funcionamiento del Ultrasonido..... | 33 |
| Figura N°25: Rango de Medición del Ultrasonido | 34 |
| Figura N°26: Sensores LVDT – Lineal Variable Differential Transformer | 37 |
| Figura N°27: Linealidad Teórica del sensor LVDT | 39 |
| Figura N°28: linealidad Teórica del sensor LVDT..... | 39 |
| Figura N°29: Transductor de presión Danfoss | 40 |
| Figura N°30: Sensor acelerómetro Honeywell, para mediciones de | 42 |
| Figura N°31: Diagrama de bloques general del sistema de simulación Sísmica. | 42 |
| Figura N°32: Diagrama de Bloques del Servo-Controlador por desplazamiento del sistema | 44 |
| Figura N°33; Respuesta de la evaluación del sistema propuesto por Blondet y C. Sparza..... | 45 |
| Figura N°34: Diagrama de control de Matlab- Simulink para el control del simulador | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura N°35: Respuesta del sistema utilizando el controlador programado en el Simulink/Matlab | 46 |
| Figura N°36: Diagrama de bloques del controlador Cascada – Desplazamiento - Aceleración | 46 |
| Figura N°37: Diagrama del controlador en cascada del Matlab – Simulink para el control del simulador | 47 |
| Figura N°38: Respuesta del sistema utilizando el controlador en cascada programado en Simulink/Matlab | 47 |
| Figura N°39: Bloque de Parámetros de la Configuración Serial | 48 |
| Figura N°40: Bloque de parámetros del receptor Serial | 49 |
| Figura N°41: Bloque de parámetros del tipo de conversión de datos..... | 52 |
| Figura N°42: Bloque de parámetros del Serial Send. | 53 |
| Figura N°43: Placa del Arduino Uno..... | 54 |
| Figura N°44: Entorno de Programación del Arduino IDE | 55 |
| Figura N°45: Empaquetado de la información transmitida a través del protocolo UART | 57 |
| Figura N°46: PLC Siemens S71200 | 58 |
| Figura N°47: Ensayos en el sistema electrohidráulico de simulación sísmica | 60 |
| Figura N°48: Respuesta del sistema de simulación sísmica de los ensayos..... | 60 |
| Figura N°49: Respuesta del sistema ante una señal senoidal a una frecuencia de 8Hz.. | 61 |
| Figura N°50: Respuesta del sistema ante señales de impulso de escalón..... | 61 |
| Figura N°51: Observación de la respuesta del sistema ante impulsos de escalón (Posición) | 62 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Tabla de cálculos del sistema hidráulico | 18 |
| Tabla 2: Componentes principales del simulador sísmico..... | 26 |
| Tabla 3: Partes de los rodamientos del sistema | 29 |
| Tabla 4: Datos evaluados del sensor LVDT teóricos y experimentales | 38 |

RESUMEN

El presente trabajo de tesis explica el diseño, desarrollo e integración de un controlador en cascada para un simulador sísmico uniaxial, el cual permite controlar las posiciones, aceleraciones y vibraciones generadas para la evaluación del comportamiento sísmico resistente de diferentes estructuras a escala natural. Para este controlador se utilizó como interfaz el microcontrolador ATmega328P y el entorno digital de programación Simulink/Matlab, mediante sus bloques de programación se configuró la comunicación por el puerto serial donde se envían 3 tipos de señales comando; constantes, variables por desplazamiento y por aceleración; los cuales se comparan con la señal de realimentación obtenida de cada sensor instalado. El sistema electrohidráulico controlado cuenta con dos actuadores hidráulicos de fuerza de compresión de 8000 Kilos y carrera de 0.32 m. cada uno, los cuales se sujetan mediante cáncamos metálicos a una plataforma de dimensiones de 3.00x3.00m. Esta conexión permite generar un desplazamiento en la plataforma tan igual al desplazamiento de los actuadores hidráulicos, de esta manera es posible centrar la plataforma e iniciar las evaluaciones con una variación de carrera de +/- 0.15m. La unidad de potencia está conformada por un motor trifásico de 25 HP encargado de generar una presión constante en ambos actuadores, los cuales debido a su diseño diferencial logran igualar la presión interna en ambas cámaras, obteniéndose así un desplazamiento mínimo. Para lograr el desplazamiento en ambas direcciones, se procede a liberar la presión en una de las cámaras y en ambos actuadores simultáneamente. De esta manera, se logra recrear un movimiento sísmico para poder analizar el comportamiento de las estructuras.

Palabras claves: Simulador, Control Electrohidráulico, Sistema de Control, Sensores

ABSTRACT

This thesis work explains the design, development and integration of a cascade controller for a uniaxial seismic simulator, which allows controlling the positions, acceleration and vibrations generated for the evaluation of the resistant earthquake behavior of different structures on a natural scale. For simulations, use it as the microcontroller interface. ATmega328P and Simulink/Matlab digital simulation environment, through its programming blocks, communication configurations through the serial port where three types of command signals are sent; constants, variable by displacement and by acceleration; which are compared with the feedback signal obtained from each installed sensor. The electrohydraulic controlled system has two hydraulic actuators of compression force of 8000 Kilos and a stroke of 0.32 m. each, which are held by metal eyebolts to a platform with dimensions of 3.00x3.00m. This connection allows generate a displacement in the platform equal to the displacement of the hydraulic actuators, in this way, it is possible to center the platform and start the evaluations with a stroke variation of +/- 0.15m. A three-phase motor of 25 HP in charge of generating a constant pressure in both actuators, which due to their differential design manage to equalize the internal pressure in both chambers, thus obtaining a minimum displacement, forms the power unit. To achieve its displacement in both directions, the pressure is released in one of the chambers in both actuators simultaneously. In this way, it is possible to recreate a seismic movement to analyze the behavior of the structures.

Keywords: Simulator, Electro hydraulic System, Control System, Sensors

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la necesidad de desarrollar estudios de comportamiento sísmico de nuevas técnicas constructivas, adicionando a la falta de disponibilidad de equipos y el alto costo que las pruebas implican, conlleva a que se busquen tecnologías de baja complejidad que permitan realizar pruebas de validación.

Los equipos con los que se cuenta en nuestro país están basados en modelos de comportamientos y métodos de integración numérica, los cuales a pesar de su complejidad no proporcionan la suficiente certeza a los resultados obtenidos. Esto como consecuencia de la falta de modelos calibrados que guarden adecuadamente la información acerca del comportamiento cíclico de los materiales sometidos a deformaciones inelásticas significativas. Por ello, los equipos con los que cuenta nuestro país consideran los efectos mencionados, dado que el Reglamento Nacional de Edificaciones vigente, solicita el análisis de estructuras.

Por tanto, el proyecto en ejecución por la universidad Ricardo Palma en conjunto con INNÓVATE PERÚ por ser la entidad que financia esta investigación, busca cubrir la necesidad de generar equipos de baja complejidad que permitan realizar las pruebas mencionadas a sistemas constructivos en general mediante ensayos de carácter dinámico, los cuales se han venido desarrollado con el diseño y construcción de un sistema electrohidráulico y que se encuentra en etapa de integración al control y adquisición de datos.

Dado esto, se ha propuesto mediante el presente proyecto de tesis diseñar el control de dicho sistema utilizando el software MATLAB en conjunto con la tarjeta de control y adquisición de datos Arduino, particularmente el control de fuerzas determinadas para romper el estado inerte de un muro de evaluación, generando movimientos oscilatorios o definidos, con el fin de lograr el fallo del material para obtener las medidas en fuerza, aceleración y desplazamiento, datos que luego de ingresados a modelos matemáticos permiten obtener una respuesta sísmica, logrando conocer valores de rigidez, elasticidad, aceleraciones de entrepisos y comportamiento visual ante la presencia del sismo.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Fundamentación y formulación del problema

1.1.1 Problema Principal

¿Cómo diseñar un controlador en cascada para un sistema electrohidráulico sísmico uniaxial, haciendo uso del software Matlab y Arduino?

1.1.2 Problemas Secundarios

- a) ¿Cómo controlar la manipulación de los actuadores electrohidráulicos?
- b) ¿Cómo integrar una interfaz de aplicación de control de funcionamiento de sistemas electrohidráulicos?
- c) ¿Cómo integrar una interfaz gráfica para controlar el funcionamiento de prototipos electrohidráulicos?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un controlador en cascada para un simulador electrohidráulico sísmico uniaxial, utilizando el software Matlab y Arduino, para realizar simulaciones sísmicas de ensayos dinámicos.

1.2.2 Objetivos Secundarios

- a) Diseñar el controlador para la interacción con los actuadores hidráulicos.
- b) Diseñar una aplicación software integrado al control del funcionamiento de sistemas electrohidráulicos.
- c) Implementar las interfaces de comunicación serial mediante el protocolo UART.

1.3 Justificación de la investigación

En el Perú existen muy pocas universidades equipadas con un laboratorio para realizar ensayos dinámicos de simulación sísmica, debido a su alto costo de adquisición y por el espacio que se requiere para su instalación. Sumado a esto, para la realización de estudios estructurales, se deben realizar pruebas sucesivas para obtener resultados óptimos como parte de la investigación. Por este motivo, y conociendo de la importancia y necesidad que existe por evaluar los diferentes tipos de materiales, se planteó diseñar un controlador apropiado para emular recreaciones de sismos ocurridos en nuestro país haciendo uso del sistema electrohidráulico construido en la Universidad Ricardo Palma. De esta manera, se logrará realizar mayor número de investigaciones por parte de la carrera de Ingeniería Civil, para obtener datos de comportamientos estructurales, analizando la aceleración y el desplazamiento que se generen, así como para realizar estudios posteriores de elasticidad y rigidez de los materiales utilizados en las pruebas hechas in situ.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

a) Simulador Sísmico Uniaxial Tele-Operable para Modelos Estructurales de Pequeña Escala.

“Artículo que presenta el diseño, construcción y validación de un simulador sísmico uniaxial para modelos estructurales de pequeña escala, para un área de carga de 2500 cm² con capacidades de 20Kg, con desplazamientos de hasta 15cm y frecuencias hasta 20Hz” (Coral, 2010, p. 95). El diagrama del simulador sísmico que se muestra en la Figura N°1 puede ser operado a través de Internet mediante una interfaz de control remoto desarrollada en Java®, la cual permite al usuario definir las señales de excitación (armónicas, barridos, impulsos, o sismos históricos), visualizar registros obtenidos de la prueba y observar el video en línea desde cualquier parte del mundo.

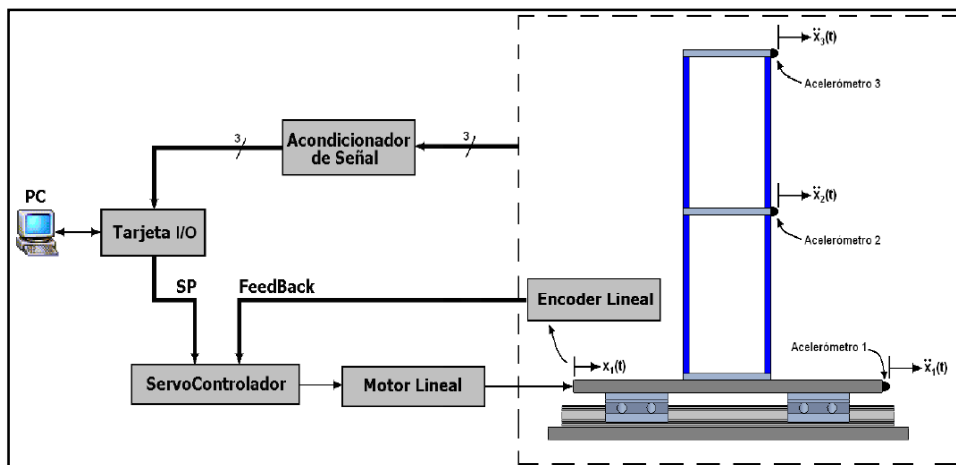


Figura N°1: Diagrama esquemático de la mesa vibratoria

Fuente: H. Coral (2010)

Este trabajo presenta un completo desarrollo de las fases de diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable con capacidad de carga de 20Kg, ancho de banda de 21Hz y desplazamientos hasta 15cm.

El diseño del sistema de control del simulador se basó en un modelo obtenido a partir de un experimento de identificación que mostró buenos resultados combinándolo con un control en cascada, corriente-velocidad-

posición; donde en cada lazo se compensan los disturbios y las no linealidades del sistema...

...Se mostró que el simulador puede tolerar prototipos de diferentes pesos sin presentar variaciones en la estabilidad y su desempeño del mismo.

(Coral, 2010, p. 114)

b) Automatización de un simulador uniaxial para estudios experimentales en ingeniería sismo-resistente.

Artículo publicado por los ingenieros Pahola Porras, Mauricio Bernal y Julián Carrillo, para la primera conferencia internacional sobre tecnología mecatrónica, Diseño y Fabricación Avanzada – AMDM 2012. En el Artículo se presentan los resultados del desarrollo de una mesa vibratoria uniaxial con sistema neumático, para ensayos de estructuras a escala reducida. Inicialmente se eligieron elementos mecánicos que permitan el movimiento de la mesa; luego, se validó el desempeño del sistema a partir de herramientas de simulación, y finalmente se realizó la automatización de la mesa por medio de un control ON-OFF con sistema lazo abierto y con un micro controlador. (Ruiz, 2013, p. 1)

c) Control robusto activo para la minimización de vibraciones en una estructura flexible de tres pisos bajo excitaciones sísmicas.

Tesis de Maestría en Ingeniería con Énfasis en Automática del Ing. Horacio Andrés Coral Enríquez (Colombia, 2010), en el cual se tiene como objetivo:

...diseñar, implementar y validar un sistema de control robusto activo que minimice las vibraciones en una estructura prototipo correspondientes a un sistema estructural losa-columna de tres pisos...

...sujeto a excitaciones sísmicas unidireccionales y controlado activamente en esa misma dirección por un motor lineal tubular o Active Mass Damper (AMD)... (Coral, 2010, p. 23)

el cual, como se puede apreciar en la Figura N°2, se encuentra:

...en el tercer piso de la estructura modelo y cuyo objetivo es el de generar fuerzas horizontales en la estructura para compensar los desplazamientos y aceleraciones que sufre la estructura a causa de fuerzas sísmicas en su base. Con resultados satisfactorios en el control con una estructura en lazos en cascada donde cuya sintonización logró un ancho de banda de casi 41Hz en el lazo de velocidad, 21Hz en el lazo de posición, y errores de seguimiento inferiores a 0.4mm. (Coral, 2010, p. 41)

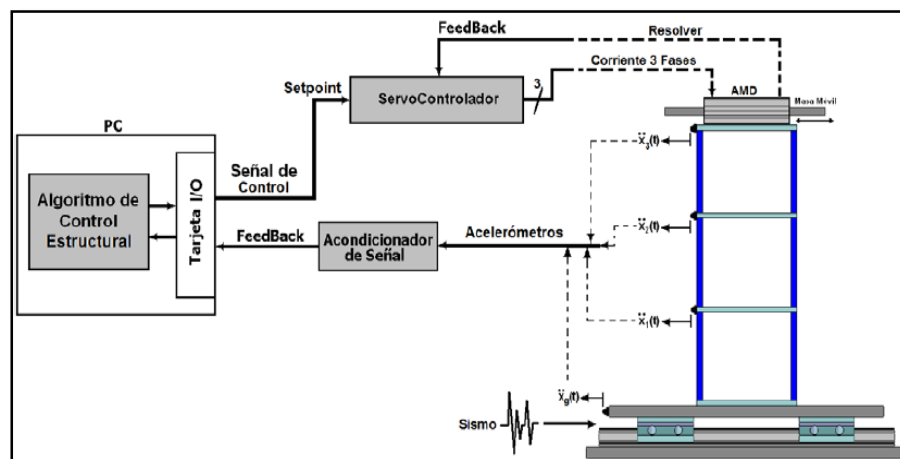


Figura N°2: Descripción de la configuración del sistema de control estructural

Fuente: H. Coral (2010)

d) Diseño y construcción de un módulo para la excitación dinámica y análisis vibracional de estructuras.

Artículo publicado por el Ing. Avid Román Gonzáles, el cual tiene como objetivo:

...diseñar y construir un módulo electrónico para producir y medir vibraciones en las estructuras de construcción civil a escala real, a efecto de poder conocer las características dinámicas de esta para tomar las decisiones correspondientes...

...obtener la aproximación a la problemática de la respuesta de una estructura a una vibración...

...análisis estructural, brindar al especialista los parámetros que le permitan tomar decisiones y evaluar la estructura bajo prueba, proponiendo el prototipo como metodología alternativa para evaluar el

riesgo sísmico de las construcciones de manera experimental y a escala real. (González, 2010, p. 5)

2.1.1 Soporte teórico de la investigación

La idea de producir entrada por un pistón lleno de aceite se introdujo en el MIT después de Long Beach en 1933. Terremoto a una mesa suspendida desde arriba por cables. Otras dos innovaciones aquí fueron de los más grandes significados. Primero fue un dispositivo analógico para usar un registro de terremoto real como entrada, y el segundo fue el control del movimiento por un circuito de retroalimentación controlado eléctricamente impulsado por error. El desarrollo de estas ideas en las mesas de sacudidas, que utilizamos hoy, tuvo que esperar el desarrollo general de ingeniería de control durante la guerra de 1939–1945, seguida por velocidades progresivamente mayores en digital cálculo. Esta historia termina (c.1985) después de que la continuación de estos avances hiciera posible el 6-DOF completo control utilizando muchos actuadores llenos de aceite, pero antes de que pudieran darnos control en tiempo real con habilidades de asistente de entrada de múltiples apoyos y el estudio experimental de comportamiento inelástico. (Severn, 2010, p. 195)

Realizar el control del sistema de simulación sísmica involucra, estudiar diversos aspectos relacionados a la dinámica de movimiento e interacción entre plataforma y estructura a ser evaluada.

La degradación del rendimiento de sistemas de simulación sísmica (Mesas Vibratorias), caracterizada por pérdidas de fidelidad en la reproducción de la señal de comando y las dificultades para mantener la estabilidad del sistema, han sido observados durante pruebas con estructuras que tienen una masa comparable a la de la plataforma de la mesa vibratoria. Algunos de estos problemas parecen ser causados por los efectos de interacción dinámica entre agitar la plataforma y la estructura de prueba. El estudio de la interacción entre la estructura y la mesa es, por lo tanto, importante para comprender el comportamiento de los sistemas de simulación sísmica

cercanos a sus límites operacionales e interpretar adecuadamente las mediciones experimentales obtenidas durante las pruebas dinámicas. (Blondet, 1988, p. 473)

En la Figura N°3, se presenta un modelo analítico desarrollado para estudiar la interacción entre la plataforma y el actuador hidráulico, siendo utilizado para la evaluación una servo-válvula y un pistón hidráulico como actuador.

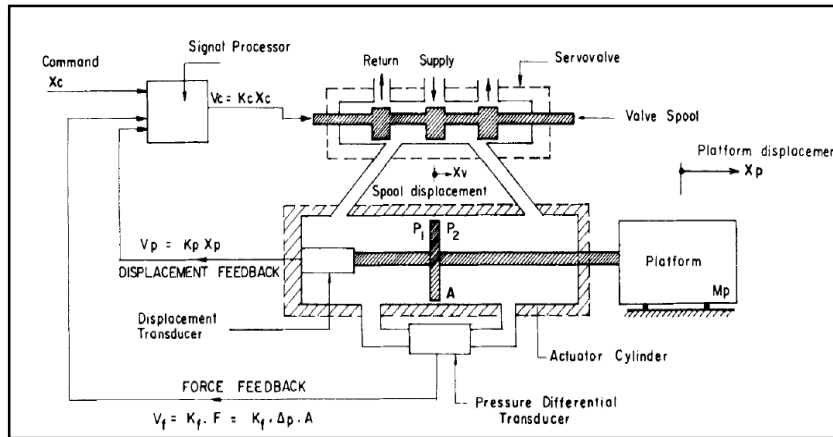


Figura N°3: Modelo simple del sistema del simulador sísmico

Fuente: Blondet y Esparza, (1988)

La teoría presentada por M. Blondet y C. Esparza indica que el modelo observado en la Figura N°3 puede ser representada matemáticamente por la siguiente función de transferencia:

$$G(S) = \frac{X_P(S)}{X_C(S)} = \frac{Kv/A}{\frac{V * Mp}{2 * B * A^2} S^3 + \frac{KLMP}{A} S^2 + S} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Esta función sirve como base para poder entender la interacción entre la plataforma y el actuador del sistema de simulación sísmica. Su diagrama de bloques se muestra en la Figura N°4.

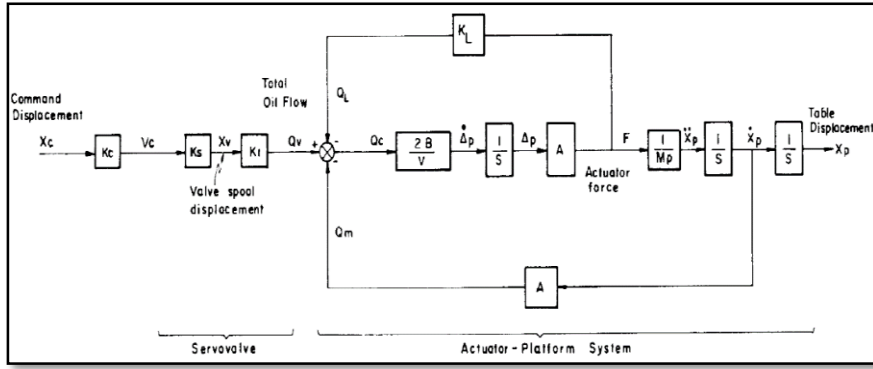


Figura N°4: Diagrama de bloques de servo-válvula – actuador – plataforma

Fuente: Blondet y Esparza, (1988)

Algunos términos del denominador de la ecuación anterior pueden asociarse con las propiedades mecánicas del sistema elástico formado por la columna de aceite y la plataforma. La rigidez hidráulica media esta dada por:

$$KH = \frac{2 \cdot B \cdot A^2}{V} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Por tanto, la frecuencia de resonancia natural de la columna de aceite-plataforma del sistema es $\omega_0 = \sqrt{(KH/MP)}$

$$\omega_0 = A \cdot \sqrt{\left(2 \cdot \frac{B}{V} \cdot MP\right)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

La amortiguación hidráulica caracterizada por el coeficiente viscoso.

$$CH = \frac{2 \cdot B \cdot A \cdot KL \cdot MP}{V} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Generalmente descrito por el factor de amortiguamiento natural

$$\xi_0 := \frac{KL}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot B \cdot MP}{V}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La función de transferencia G(s) puede ser expresada como:

$$G(s) := \frac{K_0}{\frac{1}{\omega_0^2} \cdot s^3 + \frac{2 \cdot \xi_0}{\omega_0} \cdot s^2 + s} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde $K_o = K_v/A$ (Con unidad de frecuencia, 1/seg) es la ganancia de lazo abierto (Blondet, 1988, p.474-476).

La siguiente etapa corresponde al diseño del sistema de control a lazo cerrado para poder obtener una mejor respuesta del sistema.

Para mejorar la precisión del sistema, el desplazamiento de la tabla X_p se compara continuamente con el comando Señal X_c (esto se hace en realidad comparando voltajes proporcionales, tal como se muestra en la figura N°3. La diferencia entre el comando y el desplazamiento (es decir, la señal de error E) es la realimentación a la servo-válvula, que corresponde enviando un flujo de aceite al cilindro del actuador, corrigiendo así la posición de la plataforma X_p . El bloque diagrama de Figura N° 5, representa el sistema con control de realimentación por desplazamiento. El lazo cerrado de la función de transferencia del sistema $T(S)$ está relacionado a la función de transferencia del lazo abierto a través de la expresión. (Blondet, 1988, p. 476)

$$T(S) = \frac{X_p(S)}{X_c(S)} = \frac{G(S)}{1+G(S)*H(S)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

En la Figura N°5 se muestra un diagrama de bloques del sistema actuador accionado por un servo-válvula que involucra la realimentación de dos señales de control dando al sistema una respuesta más precisa y más rápida. Es necesario determinar los valores de los bloques en cada lazo de realimentación para poder obtener la respuesta óptima ante el objetivo de recrear datos registrados durante eventos reales. (Blondet, 1988, p.746)

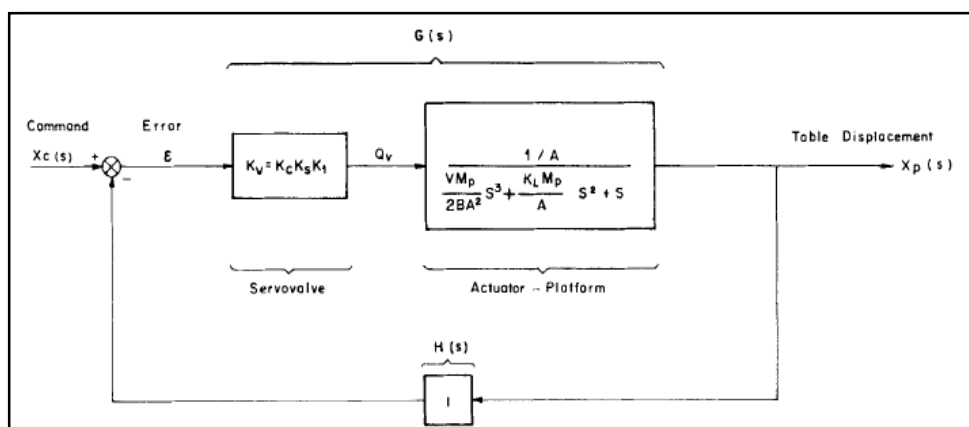


Figura N°5: Diagrama de bloques de un simulador sísmico con realimentación por desplazamiento

Fuente: Blondet y Esparza, (1988)

2.2 Definiciones conceptuales

Para el desarrollo del proyecto se debe tener en cuenta algunos conceptos para su total comprensión:

2.3.1 Sismo:

Un sismo es la liberación de energía elástica almacenada durante años por movimientos relativos entre las placas tectónicas. Esta liberación se presenta como una ruptura entre los contactos de las placas acusando vibraciones en la corteza terrestre. Con respecto a las características de los movimientos sísmicos, se consideran componentes horizontales y verticales en términos de aceleración, velocidad, desplazamiento, periodo predominante y duración. Estas características estandarizadas de movimientos terrestres están definidas por las características del suelo. En general, la aceleración es mayor en terrenos con un periodo natural corto (por ejemplo, roca), y el desplazamiento máximo es mayor en terrenos blandos donde el periodo natural es más largo; por ejemplo, suelos blandos (Bernal, 2013, p. 2).

2.3.2 Mesa Vibratoria

Una mesa vibratoria es esencialmente una plataforma móvil que simula los movimientos de un sismo en una, dos o más direcciones sobre un modelo estructural. El esquema general de una mesa vibratoria se muestra en la Figura N°6. Esta herramienta consta generalmente de una plataforma móvil, una masa de reacción, uno o más actuadores y apoyos para la plataforma, que generalmente son rodamientos lineales. Los ensayos en mesa vibratoria generalmente involucran modelos a escala reducida, aunque en los últimos años se han llevado a cabo ensayos en escala real usando mesas vibratorias como la del E-Defense en Japón o la de la Universidad de San Diego en Estados Unidos, las cuales permiten el ensayo de estructuras en escala real y simulan movimientos en 6 grados de libertad. (Bernal, 2013, p. 2).

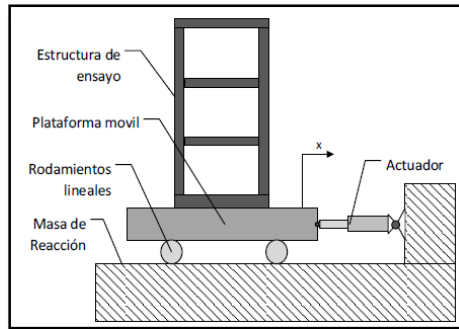


Figura N°6: Esquema general de una mesa vibratoria

Fuente: (Bernal Ruiz, 2013)

En la Figura N°7, se muestra la representación en diagrama de bloques de la mesa vibratoria, donde M es la masa de la plataforma, x es el desplazamiento horizontal de la plataforma, F_a es la fuerza del actuador, C es la constante de amortiguamiento y f el coeficiente de fricción actuando en el sistema.

La ecuación de movimiento para la plataforma de la mesa vibratoria se presenta en la ecuación 8.

$$M \cdot \frac{d^2}{dt^2} X + C \cdot \left(\frac{d}{dt} X \right) + k \cdot x := F_a(t) \quad (\text{Ecuación 8})$$

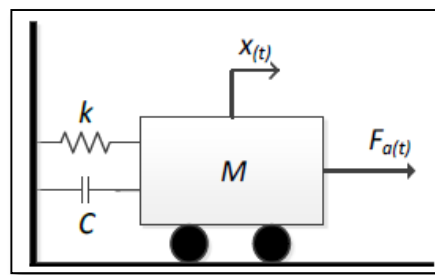


Figura N°7: Representación del diagrama de bloques de una mesa vibratoria.

Fuente: (Bernal Ruiz, 2013)

2.3.3 Ingeniería Sismo-Resistente

La ingeniería sismo-resistente centra su estudio en el comportamiento de los edificios y estructuras bajo efectos sísmicos, y se da como una unión entre la ingeniería estructural y la ingeniería sísmica. Principalmente busca comprender la interacción entre los edificios y el suelo, para prever las posibles consecuencias de fuertes terremotos en las zonas urbanas.

Esencialmente, existen dos métodos de estudio para el comportamiento estructural bajo efectos sísmicos: el análisis numérico y el análisis por pruebas experimentales. Estas dos disciplinas han tenido un desarrollo acelerado con el uso de nuevas herramientas computacionales y modernos equipos de pruebas. El método numérico generalmente se basa en estudios de elementos finitos mediante el uso de hardware robusto y modernas herramientas computacionales. Sin embargo, para estructuras complejas o innovadoras con estados límites y condiciones de cargas complejas, es imposible simular todo el comportamiento estructural satisfactoriamente (Bernal, 2013, p. 4).

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR SÍSMICO

En este capítulo se presenta la descripción, análisis y diseño del simulador sísmico. En la descripción se procede a detallar las especificaciones técnicas del sistema, así como también la descripción de sus partes. Posteriormente se presenta el análisis a partir del planteamiento del problema, para finalmente explicar paso a paso la integración de todas sus partes en el sistema.

3.1 Descripción General:

El sistema de simulación sísmica está compuesto por varios componentes, divididos en grupos, los cuales deben ser diseñados bajo ciertas consideraciones a ser presentadas más adelante.

Estos grupos son:

- **Fuente de alimentación;** puede ser eléctrica, neumática o hidráulica.
- **Interfaz Software;** medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina, equipo o dispositivo, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo. Ejemplos: Matlab, Arduino Ide, Labview, Simulink, etc.
- **Controlador;** programa informático o dispositivo que permite a un sistema operativo interactuar con un periférico haciendo una abstracción del hardware y proporcionando una interfaz; posiblemente estandarizada; ejemplos: microcontrolador, microprocesador, FPGA, etc.
- **Actuadores;** dispositivos capaces de transformar la energía brindada por la fuente de alimentación en la activación de un proceso, con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado.
- **Mecánicos y Cimentación;** todo elemento mecánico y estructural que permite a un sistema trabajar en condiciones requeridas para su funcionamiento, durabilidad, aislamiento; ejemplos: Plataforma metálica, sliders, rodamientos metálicos, loza de reacción, etc.
- **Adquisición de Datos;** proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido; ejemplos: Un sistema DAQ, Conversores ADC, etc.

3.2 Análisis del sistema de simulación sísmica:

El sistema de simulación sísmica, se encuentra diseñado a partir de los valores de carga útil máxima a ser depositada durante los ensayos experimentales, la frecuencia de operación y la aceleración que debe alcanzar para poder recrear el registro sísmico por evaluar.

Así mismo se tomaron en consideración las limitaciones al diseñar una mesa vibratoria de un grado de libertad, el cual permita validar los diferentes modelos dinámicos estructurales mediante la evaluación sísmica.

Además, se evaluaron alternativas de solución para 2 problemas principales de cierre de proyecto, la estabilidad del sistema y la fijación de la estructura a la plataforma.

3.3 Parámetros de Diseño:

Cuando se trabaja con una mesa vibratoria se tienen dos problemas principales: (a) que los requerimientos dinámicos sean correctamente escalados, y (b) que los movimientos de la mesa vibratoria sean correctamente controlados para obtener la respuesta deseada.

Los modelos que se deseen ensayar deben mantener completamente la similitud dinámica con la estructura real, para que el escalamiento no afecte los resultados del ensayo. En cuanto a las características de movimiento que ofrecen las mesas vibratorias, no existe normatividad ni reglamentación para su elección. Por ejemplo, en términos de frecuencia se encuentran mesas vibratorias que llegan a simular movimientos que varían desde 1 Hz hasta 100 Hz; cada una con diferentes capacidades de carga y de aceleraciones máximas (Bernal, 2013, p. 5).

Para realizar el diseño de los diferentes grupos, se tomaron en consideración los siguientes parámetros de diseño.

3.3.1 Fuente de alimentación:

Debido a las altas cargas de las construcciones que serán requeridas para ser evaluadas, y al ser el simulador de ensayos dinámicos a escala real, se optó por utilizar alimentación hidráulica para los actuadores. Esto es debido a que con la energía hidráulica se puede llegar a realizar trabajos que requieran de alta carga y a su vez lograr una respuesta en frecuencia aceptable.

Es por esto que el sistema cuenta con una alimentación tal como se muestra en la Figura N°8, con un motor trifásico de 25 HP y una bomba de alto caudal para alimentar a los actuadores hidráulicos.

Se tomaron también en consideración algunas características de los líquidos para el diseño y la selección del ideal para la alimentación del sistema, esas características son:

a) Fluidez

Característica de líquidos y gases que les da la habilidad de poder pasar por cualquier orificio por más pequeño que sea, siempre que se encuentre a un nivel inferior.

Es una magnitud física el cual indica la cantidad de materia que posee un cuerpo.

b) Densidad

Es una magnitud vectorial que expresa la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. Se presenta con el símbolo ρ . La densidad es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

c) Peso específico

Es la relación que existe entre el peso de un cuerpo y el volumen que ocupa.

d) Viscosidad

Es una propiedad que poseen los fluidos los cuales caracterizan su oposición a las deformaciones tangenciales. Esta propiedad se debe a las fuerzas de cohesión molecular. Todos los fluidos conocidos poseen esta propiedad.

Cabe resaltar que la viscosidad se manifiesta cuando un fluido está en movimiento y solo al observar su desplazamiento, dado este motivo se define la viscosidad como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad.



Figura N°8 Tanque del aceite hidráulico alimentador del sistema de energía hidráulica

Fuente: Elaboración Propia

Para la elección de la bomba, encargada de convertir la energía mecánica en energía hidráulica, se determinó la carga máxima por ensayo, la cual es calculada considerando una carga estática del sistema de 10 Toneladas para el sistema, más la plataforma de 3.5 toneladas y la carga dinámica, que para una aceleración máxima de 0.6 m/s^2 equivale a 6 toneladas por cambios de velocidad, originando finalmente una carga total de 19.5 Toneladas por ensayo. También se consideró la altura entre el tanque instalado en el cuarto de bombas y las electroválvulas, para el caudal necesario con motivo de realizar el desplazamiento a la velocidad y aceleración determinada utilizando la energía de una fuente como el motor eléctrico y la bomba hidráulica.

Para el cálculo del caudal se utilizó como referencia el cuadro de la tabla 1 donde para nuestro caso se usaron dos actuadores, por esta razón la fuerza máxima se divide a la mitad soportada por cada actuador.

Siendo la carga máxima 19.5 Toneladas, cada actuador requiere de una fuerza de 9.75 Tonf, utilizando finalmente un cilindro de 100mm de diámetro y un vástago de 63mm.

Tabla 1: Tabla de cálculos del sistema hidráulico

| PIEZA | Φ/Long CILD. INT. | A Cilind. Cm2 | Φ EJE | A Eje Cm2 | | DIF. AREA cm2 | PRESIÓN /BAR | FRZA /Kg. | FRZA /TON |
|------------|-------------------|---------------|-------|-----------|--|---------------|--------------|-----------|-----------|
| CL. PLANO | 7.62 | 45.60 | 5 | 19.63 | | 25.97 | 210 | 5453 | 5.5 |
| Cil. 1 plt | 8 | 50.26 | 5 | 19.63 | | 30.63 | 210 | 6432 | 6.4 |
| Cil. 2 plt | 10 | 78.54 | 6.3 | 31.17 | | 47.37 | 210 | 9947 | 9.9 |
| Cil. 3 plt | 10 | 78.54 | 5 | 19.63 | | 58.90 | 210 | 12370 | 12.4 |
| Cil. 4 plt | 11 | 95.03 | 5 | 19.63 | | 75.40 | 210 | 15833 | 15.8 |
| Cil. 5 plt | 12 | 113.09 | 5 | 19.63 | | 93.46 | 210 | 19627 | 19.6 |
| Cil. 6 plt | 13.5 | 143.14 | 5 | 19.63 | | 123.50 | 210 | 25935 | 25.9 |

Fuente: Elaboración propia

Para un diámetro de 47cm², una presión de 210 bar y una carrera de 15 cm, se tiene un volumen de uso de 705 cm³, generando una necesidad de 705 cm³/seg lo cual demanda una bomba del orden de 42300 cm³/min o 11.1 Glns/min.

En ambos sentidos, se tiene 1410 cm³, es por esto que se usan dos bombas en línea de 20 Glns/min para lograr la velocidad de 15cm/s.

Este dispositivo genera una presión en el sistema el cual se origina por la restricción que se impone a ese caudal, esta presión es proporcional a la fuerza que genera e inversamente proporcional a la superficie por donde viaja el líquido contenido, en este caso el aceite hidráulico.

Así también los filtros, que son los encargados de proteger todos los componentes del sistema hidráulico, debido a que permiten mantener limpia la línea del fluido de trabajo de partículas sólidas contaminantes de origen externo, y las generadas internamente por procesos de desgaste o de erosión de las superficies de la maquinaria, permiten de esta manera alargar la vida útil tanto de los componentes del equipo como del fluido hidráulico.

Mayormente usados en la aspiración de la bomba, líneas de presión y retorno. Su funcionamiento es principalmente sometiendo el aire, en primer lugar, a un proceso de centrifugado, de esta manera las impurezas que contiene, se proyectan contra las paredes del filtro y caen por acción de la gravedad a una cámara.

- Filtros en el lado de succión:

Ubicados antes de la bomba hidráulica, estos filtros están diseñados para proteger a la bomba contra los contaminantes que pudieran ingresar en el fluido hidráulico.

- Filtros en el lado de presión:

Situados abajo de la bomba hidráulica, diseñados para limpiar el fluido que sale de la bomba y proteger los componentes más sensibles del sistema como las válvulas de control y actuadores contra los contaminantes de la bomba.

- Filtros en el lado de retorno:

Situados entre la válvula de control y el depósito de fluido, estos filtros están diseñados para capturar los residuos de desgaste de los componentes funcionales de los sistemas hidráulicos antes de retornar el fluido al depósito. El medio filtrante en estos filtros está diseñado para eliminar las partículas de desgaste de tamaño común que puedan ser producidas por los componentes de estos sistemas.

- Filtros fuera de línea:

Independientemente del sistema hidráulico, estos filtros se utilizan para limpiar el fluido hidráulico antes de que entre al sistema hidráulico mismo. Se extrae fluido del depósito a través del filtro y se retorna al depósito.

- Filtros de aireación dentro del tanque (no se muestran en esta ilustración):

Situado en el depósito, este filtro puede usarse para impedir la entrada de humedad y contaminantes al depósito.

3.3.2 Interfaz Software

Se desarrolló una aplicación en los entornos de Simulink y Guide del Matlab, los cuales integrados nos permiten realizar el control y manipulación del simulador de manera directa a través del micro-controlador Arduino Mega 2560.

Esta interfaz es la interacción directa entre el Usuario y el Simulador de Sismos, en el cual puede controlar directamente el simulador para su control por posición, aceleración (mediante los registros sísmicos almacenados), y su control por frecuencia.

Una vez habiendo sido ingresado todos los parámetros para el ensayo, se da click en iniciar (Start) se configurará automáticamente el sistema de control programado en Simulink, el cual trabajará de acuerdo a los parámetros establecidos en el menú principal de la interfaz gráfica.

Una de las formas propuestas para la realización de los ensayos en el simulador sísmico está basada en la reproducción de eventos reales registrados en el Perú. Para lograr esto es necesario contar con los datos recopilados durante cada evento sísmico. Es así que se ha recurrido a la información obtenida por el Instituto Geofísico del Perú, el cual registra cada evento que ocurre dentro del territorio peruano, a través de múltiples sismógrafos instalados alrededor del país, tal como se muestra en la Figura N°9.

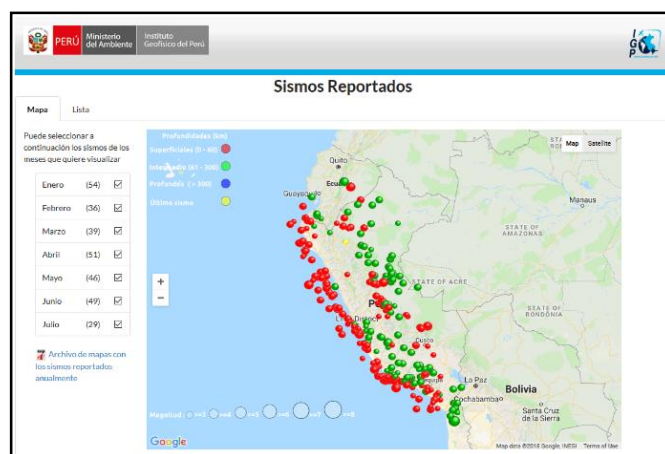


Figura N°9: Registro de los acelerógrafos instalados por el IGP alrededor del Perú

Fuente: Elaboración Propia

El acceso a la base de datos del IGP permite tratar de reproducir los eventos sísmicos al contar con el registro de aceleraciones de las ondas en cada eje (Norte-Sur, Este-Oeste, y el eje vertical). Con esta información se procedió a desarrollar una interfaz gráfica que permita leer los datos y a su vez cargarlos en el sistema de control para su manipulación.

Como se puede apreciar a continuación, el programa desarrollado permite seleccionar un archivo (formato .txt) del registro sísmico que se busca reproducir, el cual se encuentra dentro de una base de datos local trabajada para facilitar su lectura. Una vez seleccionado el registro deseado, se procede a realizar la carga de información al sistema. Esto se puede verificar en la Figura N°10, donde las gráficas de las ondas del evento sísmico se muestran en sus áreas correspondientes. Finalmente, se tiene la información del espectro de frecuencias (representado en gráfica), los tiempos de la onda P, onda S y magnitud del evento.

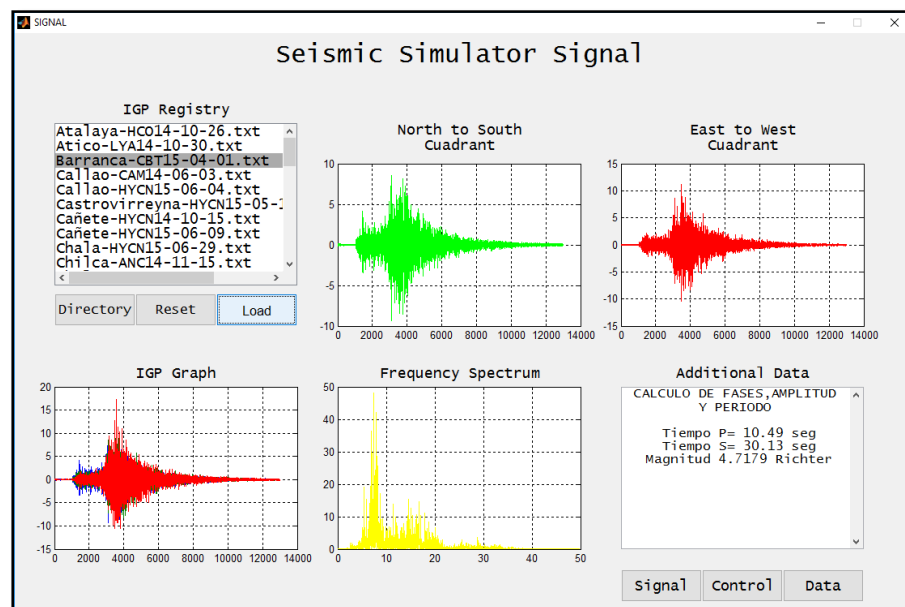


Figura N°10: Menú de Signal para la elección del registro sísmico, su descomposición en los cuadrantes para su recreación

Fuente: Elaboración Propia

El control del sistema se realiza a través de la interfaz diseñada, la cual cuenta con múltiples opciones utilizadas dentro de cada ensayo. El sistema puede ser configurado y controlado directamente desde esta interfaz ya que cuenta con la opción de inicializar el sistema hidráulico y a su vez detenerlo remotamente.

Esto es gracias a la configuración realizada mediante la herramienta de SIMULINK en conexión con el MATLAB.

Se buscó desarrollar la interfaz con la mayor cantidad de opciones que permita controlar diversos parámetros dentro de la simulación. De no configurarse ningún parámetro e iniciar un ensayo, el sistema ejecutará una prueba basándose en la información cargada previamente en la vista denominada Signal o no realizará nada de no haberse cargado ninguna información de la base de datos.

La pestaña de Control que se puede observar en la Figura N°11, permite realizar ensayos particulares a través de modificaciones en los siguientes parámetros: Frecuencia del sistema (dentro del rango de 1 Hz a 20 Hz), Duración de la prueba (dentro del rango de 10 segundos a 30 segundos), Valor Offset para la posición de la plataforma (dentro del rango de 0 cm a 100 cm). Estos parámetros configuran la señal de control para obtener una senoidal oscilatoria de distintos niveles. Adicionalmente, y con el objetivo de registrar en video los ensayos, se implementó el control de una cámara multimedia.

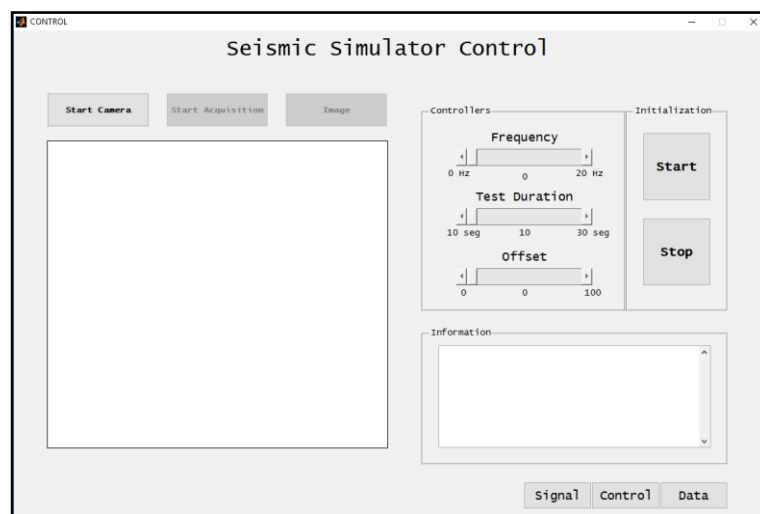


Figura N°11: Menú principal de carga de parámetros e iniciación de pruebas

Fuente: Elaboración Propia

Esta característica final en conjunto con el control de los parámetros nos permite realizar ensayos de manera completamente remota, lo cual nos permite instalar el sistema de control en una zona segura e independiente del cuarto donde se encuentra instalada la plataforma.

La información correspondiente al ensayo es registrada por medio de 3 acelerómetros distribuidos en distintos niveles y posiciones dentro de la estructura que se busca evaluar. El menú de registros de aceleraciones se muestra en la Figura N°12. Estos instrumentos transmiten los datos hacia la tarjeta de control Arduino, la cual a su vez la transfiere al sistema donde es recopilada dentro del servidor local. Esta información es luego visualizada en gráficos generados automáticamente por el sistema y donde se pueden comparar las aceleraciones experimentadas para cada ubicación y nivel de evaluación.

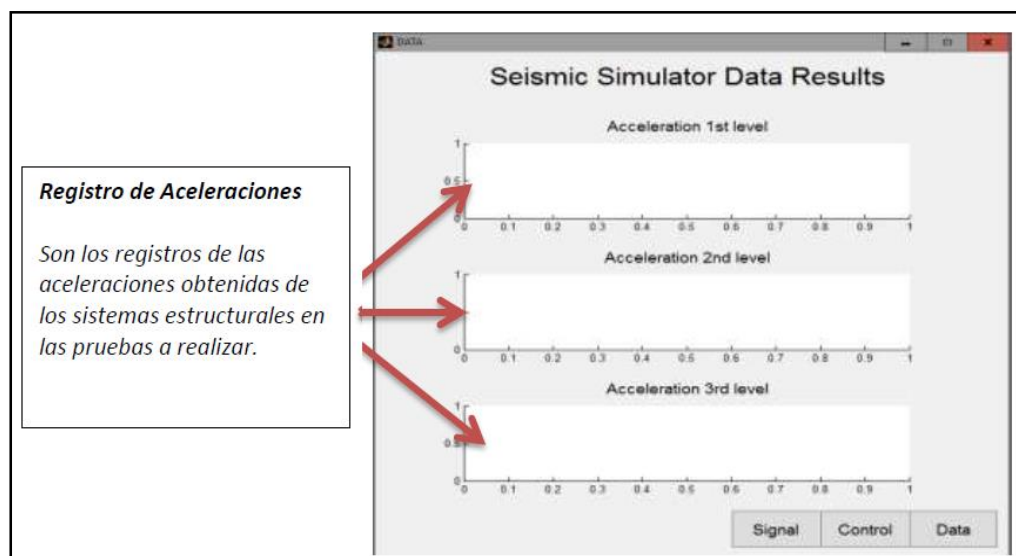


Figura N°12: Cuadro de registro de aceleración de los diferentes pisos de la estructura por ser evaluada

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, la información guardada en la base de datos local del sistema tiene la finalidad de ser estudiada a fondo de manera teórica y en conjunto con los resultados observables de cada ensayo por los interesados de distintos campos de trabajo.

3.3.3 Controlador

Para proceder con el diseño del sistema de control se requiere conocer el modelo de la planta a controlar, proceder con la implementación, realizar un proceso de calibración hasta obtener la respuesta ideal, tal como se muestra en la Figura N°13.

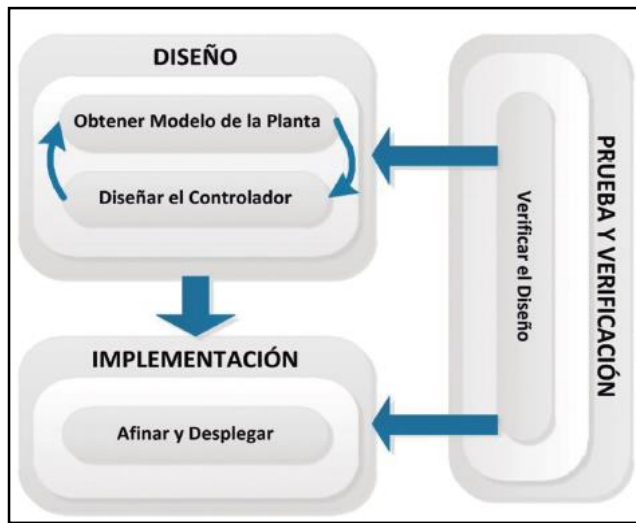


Figura N°13: Etapas de desarrollo de un sistema de control.

Fuente: MathWorks, 2016

Para el objetivo de este estudio, se trabajó con el microcontrolador Arduino Mega 2560, conectado de manera serial al ordenador y vinculado al Matlab para poder hacer uso de los aplicativos del control por software Simulink. A su vez se utilizó un PLC Siemens S7 1200-1212C, con la finalidad de poder vincularlo al Arduino de manera eléctrica, reemplazando a los dispositivos de potencia, contactores y relevadores.

3.3.4 Actuadores

Para este tipo de trabajo físico, donde las masas por evaluar son altas y las pérdidas de velocidad deben ser mínimas en los cambios de dirección, se diseñó un tipo de pistón hidráulico, denominado pistón diferencial. Este tipo de actuador consiste en un pistón de doble vástago, el cual permite seguir trabajando con altas cargas de evaluación. Debido a que su diseño permite igualar las áreas de cada cámara, con el propósito de poder generar en ambas direcciones la misma velocidad de liberación de presión y la misma fuerza tanto de compresión como de tracción.

Tal como se muestra en la Figura N°14, el diseño de este tipo de actuador, involucra utilizar un tipo diferente de técnica de alimentación hidráulica.

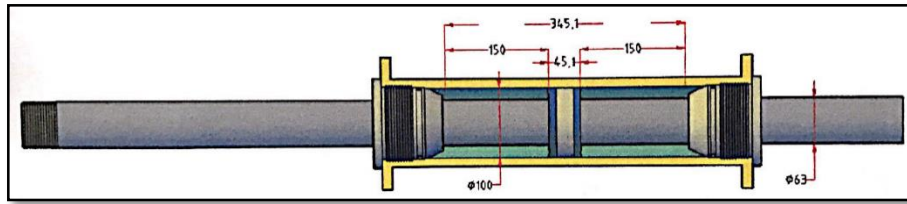


Figura N°14: Diseño del Pistón diferencial de doble vástago

Fuente: Elaboración Propia

Para este tipo de actuador, el sistema hidráulico realiza la tarea principal de enviar aceite a presión a ambas cámaras de los actuadores, para de esta manera obtener un desplazamiento mínimo en ambos pistones. Posteriormente para poder realizar un cambio de dirección, el sistema libera presión de una de las cámaras mediante las electroválvulas de desfogue rápido, las cuales se activan al mismo tiempo en ambos actuadores instalados, para evitar el desfase entre ellos, lo cual podría ser perjudicial para el sistema de simulación sísmica.

3.3.5 Mecánicos y Cimentación

La interacción entre el actuador y la plataforma se lleva a cabo mediante su amarre con los cáncamos metálicos, el cual permite de esta manera que los desplazamientos de los pistones, sean los mismos que los desplazamientos de la plataforma metálica, para de esta manera lograr que la vibración con la que oscilan los pistones sea la misma que las de la plataforma.

En la figura N°15 se puede observar el esquema de los componentes que conforman la mesa vibratoria. Así también en la tabla N°2 se puede observar el nombre de los componentes del sistema mecánico.

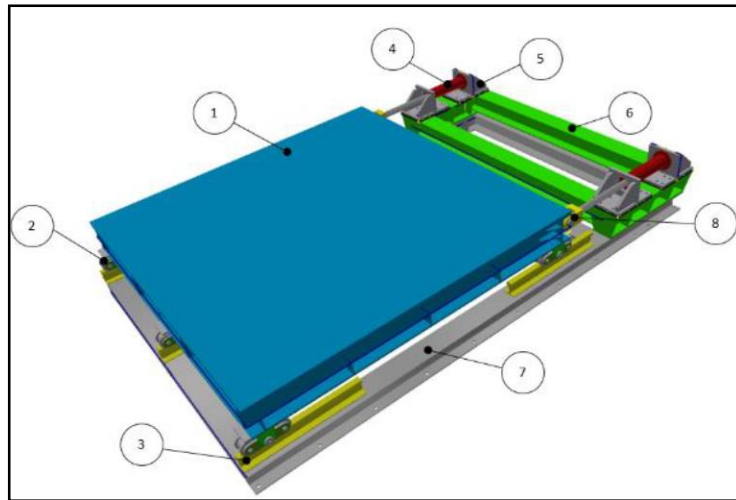


Figura N°15: Componentes principales del simulador Sísmico

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2: Componentes principales del simulador sísmico

| Número | Descripción |
|--------|-------------------------------------|
| 1 | Tablero móvil – Plataforma metálica |
| 2 | Ruedas metálicas |
| 3 | Rieles – Sliders |
| 4 | Actuadores hidráulicos |
| 5 | Base del actuador |
| 6 | Soporte de actuadores |
| 7 | Bastidor |
| 8 | Conexión Actuador - Plataforma |

Fuente: Elaboración Propia

El sistema mecánico, que se muestra en la Figura N°16, se encuentra conformado por 2 actuadores hidráulicos de fuerza de compresión y tracción de 8 toneladas-fuerza cada uno, estos se encuentran amarrados, mediante cáncamos metálicos, a una plataforma metálica de 3x3 metros y un espesor de 1 pulgada, la cual descansa sobre 6 rodamientos metálicos apoyados en guías unidireccionales, llamadas comúnmente sliders, los cuales permiten que el sistema se desplace en una sola dirección.

Los actuadores hidráulicos, son los encargados de generar todos los movimientos de la plataforma en los ensayos por ser realizados. se encuentran fijos en una loza de concreto armado, conocido como loza de reacción, la cual,

como requerimiento estructural, se encuentra dimensionada a un peso igual a 3 veces la carga máxima por evaluar en el simulador (Peso de la plataforma + Peso de la estructura a ser evaluada), debido a que debe soportar todas las fueras de corte y compresión generadas por estas en los ensayos sísmicos.



Figura N°16: Pistones hidráulicos, instalados en la loza de reacción

Fuente: Elaboración Propia

El sistema cuenta con una plataforma metálica de 3x3 metros y 1 pulgada de espesor. A la vez es la encargada de soportar el peso de la estructura por ser evaluada, así como la suma de todas las fuerzas que se generen al momento de ser sometido a ensayos dinámicos.

Por esta razón es que la plataforma también cuenta con vigas entrecruzadas en la parte inferior de la misma. La distribución de estas vigas es determinada a partir de la evaluación de las áreas de mayor esfuerzo dinámico al momento de las pruebas.

Es también la encargada de fijar la estructura a través de unos pernos pasantes. En la Figura N°17 se puede observar la plataforma metálica del simulador sísmico y en la Figura N°18 la distribución de las vigas en la parte inferior de la plataforma. Las consideraciones de su diseño serán presentadas más adelante.

Esta plataforma descansa sobre 6 rodamientos de acero, los cuales se encuentran diseñados para permitir reducir al máximo los rozamientos entre la plataforma y los sliders.



Figura N°17: Plataforma metálica del simulador sísmico

Fuente: Elaboración Propia

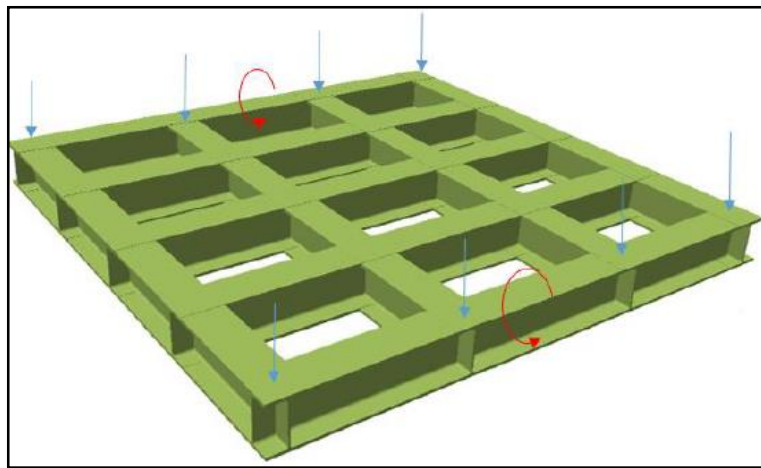


Figura N°18: Distribuciones de las vigas H, parte inferior de la plataforma

Fuente: Propia

Estos rodamientos se encuentran diseñados directamente proporcional a la carga neta de la estructura y plataforma.

En la Figura N°19 y la tabla N°3, se puede observar el diseño de los rodamientos y sus partes principales.

Estos rodamientos se encuentran apoyados sobre sliders metálicos los cuales permiten que el movimiento de los ensayos se mantenga en una sola dirección para realizar las evaluaciones correspondientes sin alteración de la data colectada.

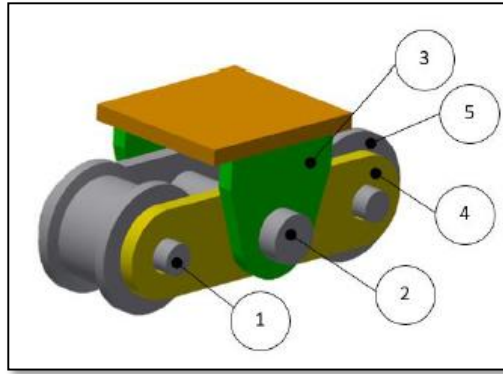


Figura N°19: Diseño de los rodamientos del sistema

Fuente: Propia

Tabla 3: Partes de los rodamientos del sistema

| Número | Descripción |
|--------|-----------------------|
| 1 | Eje Rodillo |
| 2 | Eje Pivot |
| 3 | Cáncamo de las ruedas |
| 4 | Placas |
| 5 | Rodillo (+rodamiento) |

Fuente: Propia

Los sliders se encuentran soldados a unas vigas de apoyo, que se encuentran ancladas mediante pernos de anclaje a la platea base del simulador. En la Figura N°20 se puede apreciar su diseño

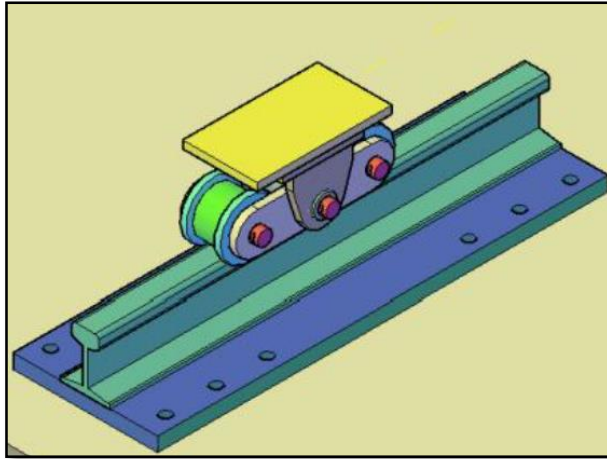


Figura N°20: Vista principal de los rodamientos y sliders

Fuente: Elaboración Propia

Si bien es cierto, el estudio estructural no forma parte de los alcances dentro de la presente tesis, sin embargo, es necesario mencionar que para el diseño de la plataforma metálica y la cama de vigas H que se encuentran soldadas fueron determinadas por el estudio de distribución de cargas para los ensayos a realizar.

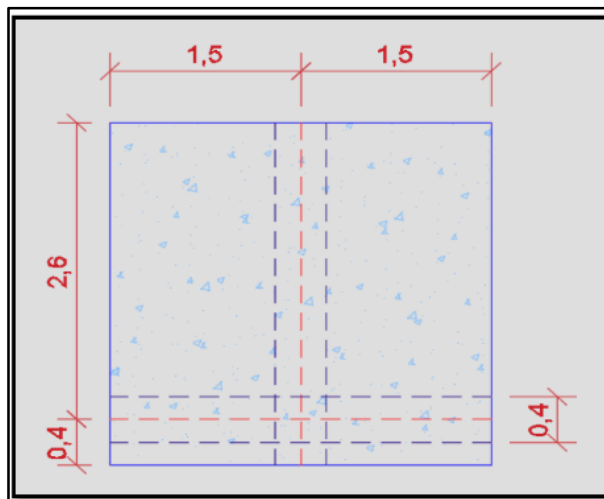


Figura N°21: Ensayos de muros para encuentro de T invertido

FUENTE: Javier Cerón (2017)

Para el ensayo de la Figura N°21 se consideraron muros con encuentros en “T” invertido, con un espesor desde 0.10m hasta 0.40m (Líneas azules), donde estos muros podrían ser de distintos materiales tales como ladrillos, adobes, tapia, quincha, entre otros, siempre y cuando no excedan la capacidad de 10 Toneladas.

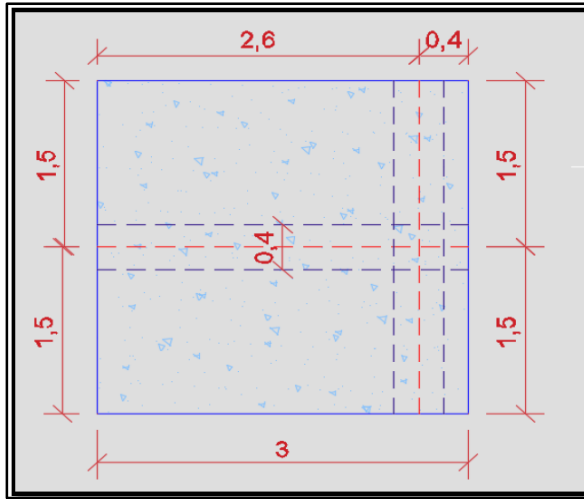


Figura N°22: Ensayos de Muros para encuentros en “T” Horizontal

FUENTE: Javier Cerón (2017)

Para el ensayo de la Figura N°22 se ensayaron muros con encuentros en “T”, con un espesor desde 0.10m hasta 0.40m (Líneas azules), donde estos muros podrían ser de distintos materiales tales como ladrillos, adobes, tapia, quincha, entre otros, siempre y cuando no excedan la capacidad de 10 Toneladas.

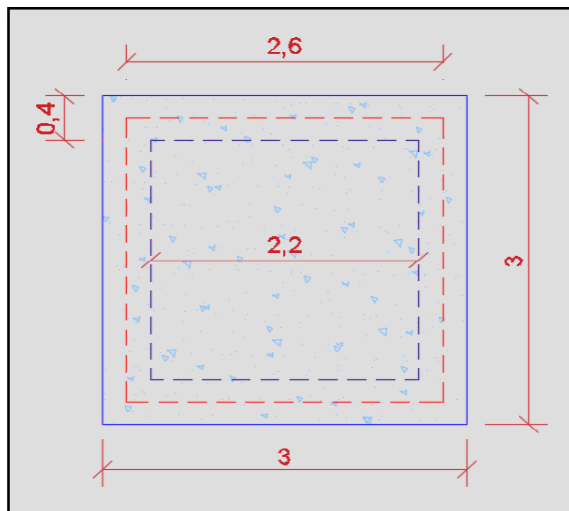


Figura N°23: Ensayos de módulos de 3.00m x 3.00m

FUENTE: Javier Cerón (2017)

Para el ensayo de la Figura N°23 se consideró una construcción cerrada al borde de la mesa, donde esta construcción podría ser de distintos materiales, siempre y cuando no excedan la capacidad de 10 Toneladas

3.3.6 Adquisición de Datos

Para la adquisición de los datos obtenidos por los sensores se utilizó el Arduino Mega 2560, por contar con 10 canales ADC, los cuales permiten conectar hasta 10 sensores y recopilar la data de las pruebas y control a su vez.

Una vez conectado los sensores a la tarjeta de Arduino, este se conecta mediante puerto USB serial a la computadora, en el cual, una vez instalado los drivers de configuración del Arduino IDE, se encuentra listo para poder realizar las calibraciones y configuraciones en la tarjeta. Esto es posible debido a que se asigna automáticamente un puerto de comunicaciones Serial entre el Matlab y el Arduino a través del puerto COM 'X'. Una vez que se logra este enlace, toda la información de entrada como de salida del Arduino mega será enviado por este puerto serial COM.

Toda la información será recibida a través del Simulink mediante un bloque de programación que permite leer la data que ingresa por ese puerto COM, para poder ser procesada y trabajada en el sistema, como la información de lazo cerrado del sistema de control.

Para poder recopilar la información de los ensayos, se necesita contar con sensores electrónicos los cuales son dispositivos que transforman las variables análogas, de desplazamiento y aceleración en señales eléctricas que el Arduino y cualquier tipo de tarjeta de adquisición de datos puede leer e interpretar para brindar los resultados de cada ensayo.

Los sensores electrónicos que fueron usados para la evaluación de este sistema fueron los siguientes:

3.3.6.1 Sensores Ultrasonidos

Son sensores que emiten sonidos a una frecuencia de operación de 40Khz, mayor que la máxima audible por el oído humano y cuyo funcionamiento básico es la de medir distancias mediante la emisión de una onda sónica mediante un transmisor (trigger) el cual en

determinado momento rebotará sobre un objeto y la reflexión de ese pulso es detectada por un receptor (echo).

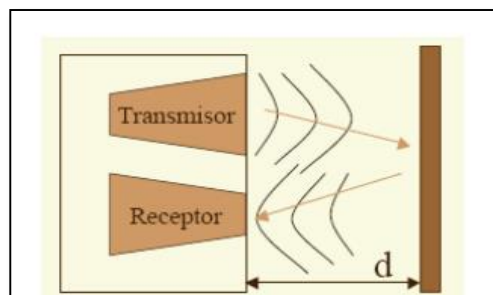


Figura N°24: Funcionamiento del Ultrasonido

Fuente: Internet, 2015

Los sensores a utilizar realizan una medición del tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la recepción del mismo, tal como se muestra en la Figura N°24, estableciéndose una distancia a la que se encuentra el objeto u obstáculo que ha producido dicha reflexión de la onda sonora. Dicho tiempo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Distancia = \frac{1}{2} * V * T \quad (Ecuación 9)$$

Siendo V la velocidad del sonido en el aire y T el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso

Entre los problemas que presentan los ultrasonidos, es que a pesar de que su funcionamiento que parece muy sencillo, existen factores inherentes tanto a los ultrasonidos como al mundo real, que influyen de una forma determinante en las medidas realizadas. Entre los diversos factores que alteran las lecturas que se realizan con los sensores de ultrasonido cabe destacar:

- El campo de actuación del pulso que se emite desde un transductor de ultrasonido tiene forma cónica. El eco que se recibe como respuesta a la reflexión del sonido indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra dentro del cono acústico y no especifica en ningún momento la localización angular del mismo. Aunque la máxima probabilidad es que el objeto detectado esté sobre el eje central del cono

acústico, la probabilidad de que el eco se haya producido por un objeto presente en la periferia del eje central no es en absoluto despreciable y ha de ser tomada en cuenta y tratada convenientemente.

- La cantidad de energía acústica reflejada por el obstáculo depende en gran medida de la estructura de su superficie. Para obtener una reflexión altamente difusa del obstáculo, el tamaño de las irregularidades sobre la superficie reflectora debe ser comparable a la longitud de onda de la onda de ultrasonido incidente.
- En los sensores de ultrasonido de bajo coste se utiliza el mismo transductor como emisor y receptor. Tras la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo. Esto implica que existe una distancia mínima d , que se muestra en la Figura N°25, (proporcional al tiempo de relajación del transductor) a partir de la cual el sensor mide con precisión. Por lo general, todos los objetos que se encuentren por debajo de esta distancia, d , serán interpretados por el sistema como que están a una distancia igual a la distancia mínima.

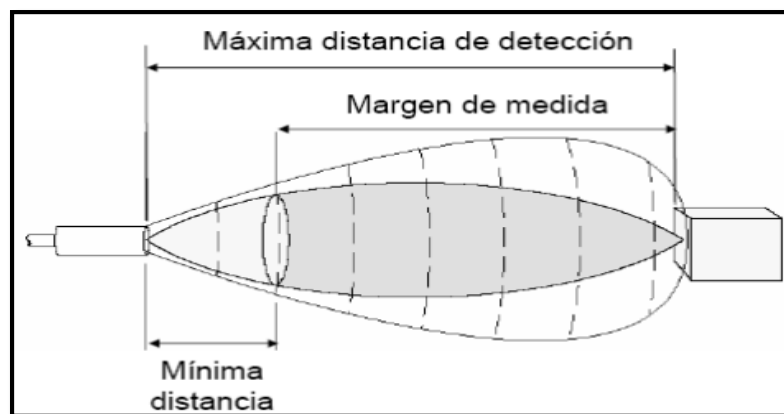


Figura N°25: Rango de Medición del Ultrasonido

Fuente: Internet, 2015

En este tipo de sensores los factores ambientales tienen una gran repercusión en las medidas: las ondas ultrasónicas debido a que viajan

por un medio ambiental como el aire. La densidad del aire depende de la temperatura, influyendo este factor sobre la velocidad de propagación de la onda según la expresión:

$$V_s = V_{so} * \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Siendo V_{so} la velocidad de propagación de la onda sonora a 0°C y T la temperatura absoluta (grados Kelvin)

Por esto es que la temperatura afecta la capacidad de detección.

Un factor de error muy común es el conocido como falsos ecos, los cuales se pueden producir por razones diferentes: Puede darse el caso en que la onda emitida por el transductor se refleje varias veces en diversas superficies, antes que vuelva a incidir en el transductor. Este fenómeno, conocido como reflexiones múltiples, implica que la lectura del sensor evidencia la presencia de un obstáculo a una distancia proporcional al tiempo transcurrido en el viaje de la onda; es decir, una distancia mucho mayor que a la que está en realidad el obstáculo más cercano, que pudo producir la primera reflexión de la onda. Otra fuente más común de falsos ecos, conocidos como crosstalk, se produce cuando se emplean una serie de ultrasonidos que trabajan al mismo tiempo. En este caso ocurre que a una frecuencia relativamente alta, un sensor emite un pulso y sea recibido por otro sensor que estuviese esperando el eco del pulso que él había enviado con anterioridad (o viceversa).

- Las ondas de ultrasonido obedecen a las leyes de reflexión de las ondas, por lo que una onda de ultrasonido tiene el mismo ángulo de incidencia y reflexión respecto a la normal a la superficie. Esto implica que, si la orientación relativa de la superficie reflectora con respecto al eje del sensor de ultrasonido es mayor que un cierto umbral, el sensor nunca reciba el pulso de sonido que emitió.

3.3.6.2 Sensores LVDT (Desplazamiento líneal)

Un L.V.D.T (Linear Variable Differential Transformer) es un transformador que produce una tensión proporcional al desplazamiento de un núcleo ferromagnético (núcleo móvil separado). Este tipo de transductor consiste en un bobinado primario alimentado por una señal C.A. y dos bobinados Secundarios. Su diseño se muestra en la Figura N°26.

El núcleo es una aleación de hierro y níquel, que se encuentra laminado longitudinalmente para reducir las corrientes de Foucault. El vástago que lo arrastra no debe ser magnético. Todo el conjunto puede apantallarse magnéticamente para hacerlo inmune a campos externos.

Cuando el núcleo se desplaza al interior de estas bobinas genera voltajes inductivos (V1) y (V2) en cada bobina secundaria, proporcionales a su desplazamiento.

Los dos bobinados secundarios están conectados en serie y en fases opuestas, de modo que la señal de salida es la diferencia entre estos voltajes. En esta configuración, el voltaje de salida es Cero, cuando el núcleo se encuentra en el centro y las dos tensiones (V1) y (V2) se anulan. Cuando el núcleo se desplaza hacia las extremidades del captador la diferencia aumenta más y más. La señal de salida se rectifica con el fin de obtener una tensión continua, representativa de la posición del núcleo.

Características y Ventajas:

- Alta Resolución.
- Robusto
- Fácil Instalación
- Precio Favorable
- Resistencia a la aceleración
- Resistencia al envejecimiento
- Extremadamente preciso

Debido a esto es que se instaló en la base de la plataforma, para poder medir la posición en todo momento de la mesa, con el fin de usarlo como realimentación de lazo cerrado del sistema electrohidráulico, para el primer controlador por desplazamiento.



Figura N°26: Sensores LVDT – Lineal Variable Differential Transformer

Fuente: Propia

En el desarrollo de esta investigación se realizaron pruebas con varios tipos de sensores, destacándose el uso de los sensores ultrasonidos y los sensores de desplazamiento lineal LVDT, tal como se muestra en la Figura N°27 y Figura N°28. Sin embargo, el sensor que presenta más linealidad en su medida y permite una mejor estabilidad en el sistema son los LVDT, las pruebas realizadas con este tipo de sensor se pueden observar en la Tabla 4, donde se puede notar su linealidad tanto teórico como experimental.

Tabla 4: Datos evaluados del sensor LVDT teóricos y experimentales

| VALORES TEÓRICOS | | VALORES EXPERIMENTALES | |
|------------------|--------|------------------------|---------|
| cm | volt | CM | VOLTAJE |
| 1 | 0.1291 | 1.0320 | 0.1304 |
| 1.5 | 0.1937 | 1.4756 | 0.2134 |
| 2 | 0.2583 | 2.0314 | 0.2613 |
| 2.5 | 0.3228 | 2.5407 | 0.3290 |
| 3 | 0.3874 | 3.0404 | 0.3901 |
| 3.5 | 0.4520 | 3.5486 | 0.4536 |
| 4 | 0.5165 | 4.0568 | 0.5206 |
| 4.5 | 0.5811 | 4.5650 | 0.6001 |
| 5 | 0.6457 | 5.0732 | 0.6545 |
| 5.5 | 0.7102 | 5.5814 | 0.7180 |
| 6 | 0.7748 | 6.0895 | 0.7843 |
| 6.5 | 0.8394 | 6.5977 | 0.8410 |
| 7 | 0.9039 | 7.0399 | 0.9091 |
| 7.5 | 0.9685 | 7.4590 | 0.9740 |
| 8 | 1.0331 | 8.0354 | 1.0410 |
| 8.5 | 1.0976 | 8.5610 | 1.1040 |
| 9 | 1.1622 | 9.0456 | 1.1688 |
| 9.5 | 1.2268 | 9.8406 | 1.2333 |
| 10 | 1.2913 | 10.1230 | 1.2978 |
| 11 | 1.4205 | 11.4317 | 1.4248 |
| 12 | 1.5496 | 12.1564 | 1.5940 |
| 13 | 1.6787 | 13.4564 | 1.6847 |
| 14 | 1.8079 | 14.5464 | 1.8090 |
| 15 | 1.9370 | 15.1043 | 1.9410 |
| 20 | 2.5827 | 20.3154 | 2.6032 |
| 21 | 2.7118 | 21.4563 | 2.7810 |
| 22 | 2.8409 | 22.4561 | 2.8910 |
| 23 | 2.9701 | 23.4567 | 3.0410 |
| 24 | 3.0992 | 24.4564 | 3.1870 |
| 25 | 3.2283 | 25.6184 | 3.2410 |
| 30 | 3.8740 | 30.1278 | 3.8905 |

Fuente: Elaboración Propia

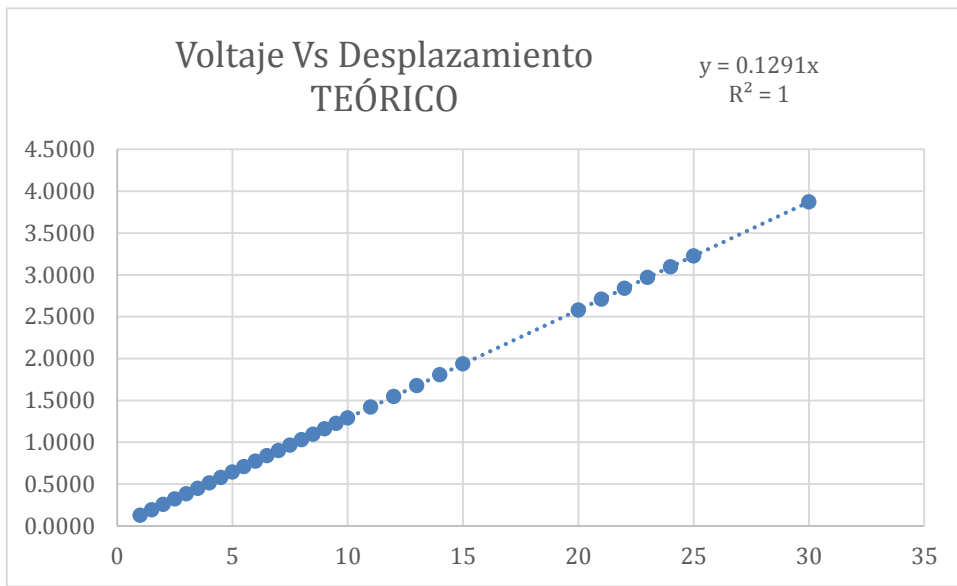


Figura N°27: Linealidad Teórica del sensor LVDT

Fuente: Elaboración Propia

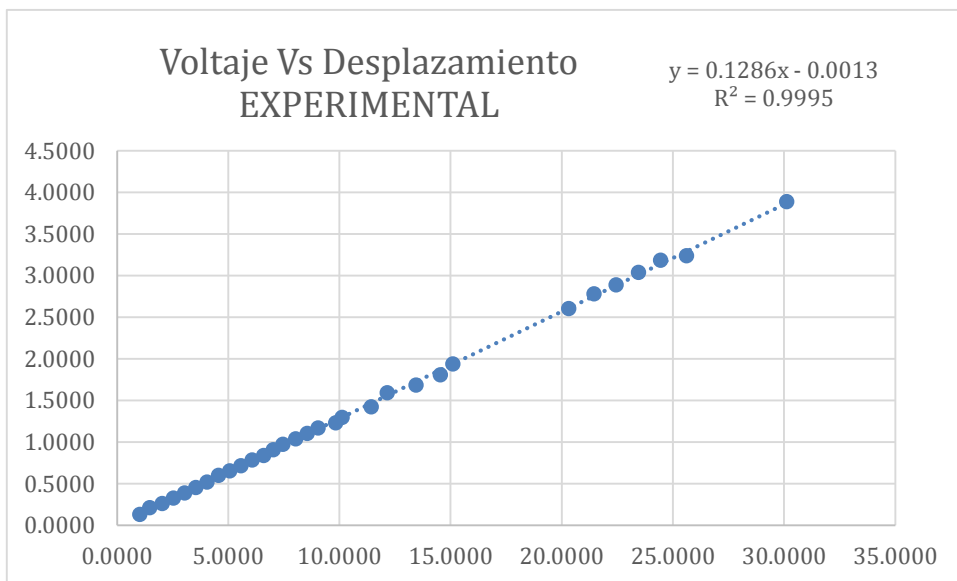


Figura N°28: linealidad Teórica del sensor LVDT

Fuente: Elaboración Propia

3.3.6.3 Transductores de Presión MBS 3050 – Danfoss

Los transductores de presión, permiten evaluar la diferencial de presión de ambas cámaras del sistema, para poder analizar de esta manera la aceleración en el cambio de diferencial, obteniendo así la medición del sistema para de esta manera calcular las fuerzas generadas en la plataforma a lo largo de la duración de la prueba.

Se puede visualizar su diseño en la Figura N°29.

El material del que está fabricado lo hace resistente a efecto de cavitación, golpe de ariete y picos de presión.

Su carcasa y partes en contacto con el medio fabricadas en acero inoxidable, resistente a los ácidos. Se alimenta desde 9 hasta 32 Voltios Dc, el cual cuenta con protección de polaridad.

Cuenta con salidas estándar de 4 – 20mA; 0 – 5V; 1 – 5V; 1 – 6V; 0 – 10V; y 1 - 10V.

Cuenta con compensación de temperatura y calibración por láser.



Figura N°29: Transductor de presión Danfoss

Fuente: Propia

Este tipo de transductor tiene una amplia gama de aplicaciones, en sistemas hidráulicos, los cuales experimentan cambios en la velocidad de caudal, sufren efectos de cavitación, golpe de ariete y picos de presión.

Su instalación en posición vertical minimiza el riesgo de obstrucción de la boquilla con partículas.

Cuenta con una precisión de $\pm 0.5\%$ Fs (Típ), tiene un tiempo de respuesta menor a 4ms con líquidos de viscosidad 100 cSt.

3.3.6.4 Acelerómetros Honeywell

Sensores encargados de medir las vibraciones generadas en la plataforma base y en los diferentes niveles que se evalúen.

El modelo a ser usado en el sistema es el modelo MA15, que se puede observar en la Figura N°30, el cual es un acelerómetro piezoeléctrico de bajo costo, el cual comúnmente es designado a ser usado en pruebas industriales y automatización, incluyendo para pruebas en laboratorios, estudios modales y celdas de prueba. Tiene una baja impedancia de salida constante, combinada con la capacidad de conducir una alta capacidad de carga, permite largos recorridos de cable de bajo costo sin degradación de datos.

Este modelo presenta una alta frecuencia natural, un amplio rango de frecuencias y una respuesta plana de sensibilidad frente a la temperatura.

Sobre el rango de temperatura. El elemento sísmico es mecánicamente aislado de la base de montaje, lo que resulta en una base baja sensibilidad a la alta tensión.

Sus materiales de acero inoxidable son no magnéticos, dando como resultado una muy baja susceptibilidad de campo magnético.



Figura N°30: Sensor acelerómetro Honeywell, para mediciones de vibraciones en el simulador.

Fuente: Internet, 2016

Todos estos grupos, forman parte del sistema de simulación sísmica, el cual una vez integrado fue usado para realizar la interacción entre el operario y la estructura a ser evaluada.

En la Figura N°31, se puede observar la integración de todos los grupos diseñados e integrados en el sistema de simulación sísmica.

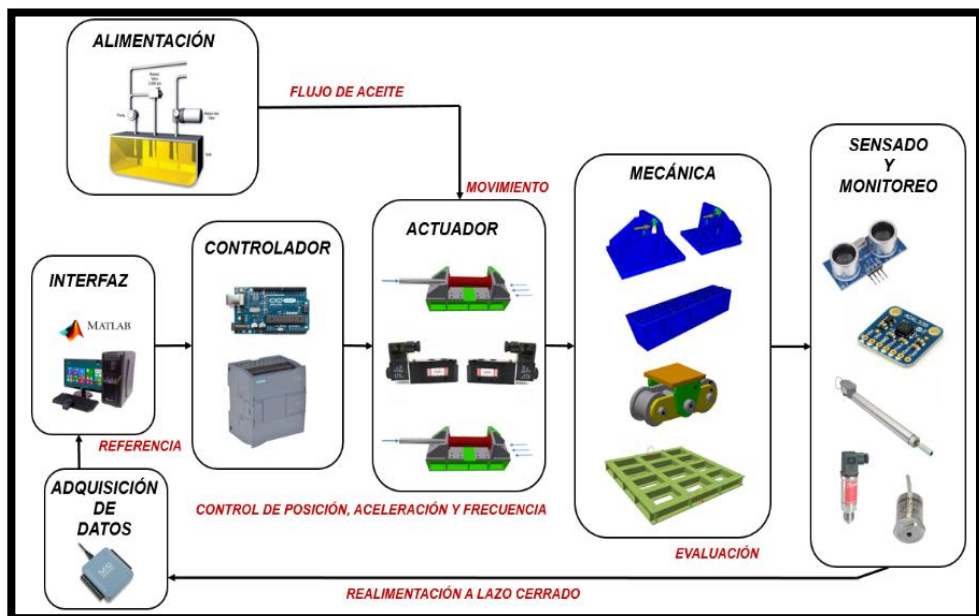


Figura N°31: Diagrama de bloques general del sistema de simulación Sísmica.

Fuente: Elaboración Propia

En el diagrama de bloques se puede ver todas las partes que constituyen el simulador sísmico uniaxial, por el cual a través de la interfaz se envía la posición deseada; señal comando; por medio del controlador hacia los actuadores mecánicos, a su vez se mide su posición y aceleración; señales de realimentación; mediante sensores de desplazamiento lineal (LVDT) y acelerómetros, la comparación de ambas señales correspondientes determina el error que el sistema debe mantener lo más próximo a cero para seguir la posición y aceleraciones deseadas, de esta manera se recrean oscilaciones de desplazamiento y de aceleración.

De esta manera se genera el control a lazo cerrado del sistema de simulación sísmica, en el cual las cargas y aceleraciones afectan tanto las respuestas con la estabilidad del sistema.

CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL, ELECTRÓNICO, HIDRÁULICO PARA EL SIMULADOR SÍSMICO

4.1 Descripción del Sistema de Control

El controlador y el análisis del sistema se desarrollaron en Matlab/Simulink, donde su diagrama de bloques es tal como muestra la Figura N°32. Este controlador, el cual cumple la función de servo controlador por desplazamiento del sistema, es el encargado de determinar las diferentes posiciones de la plataforma mediante el control por desplazamiento de los actuadores hidráulicos y la plataforma, durante el ensayo sísmico.

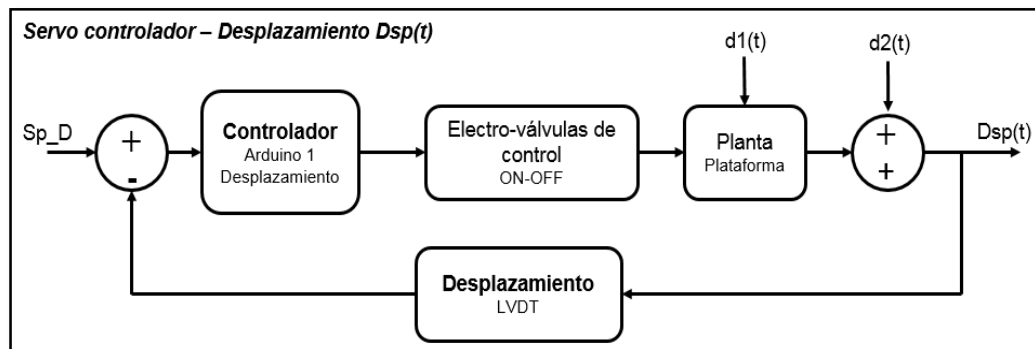


Figura N°32: Diagrama de Bloques del Servo-Controlador por desplazamiento del sistema

Fuente: Propia

Para poder realizar una comparación del sistema de interacción entre plataforma y actuador, se utilizó la función de transferencia presentado por Blondet y C. Esparza (Blondet y Esparza, 1988). La respuesta a una fuente senoidal se muestra en la Figura N°33.

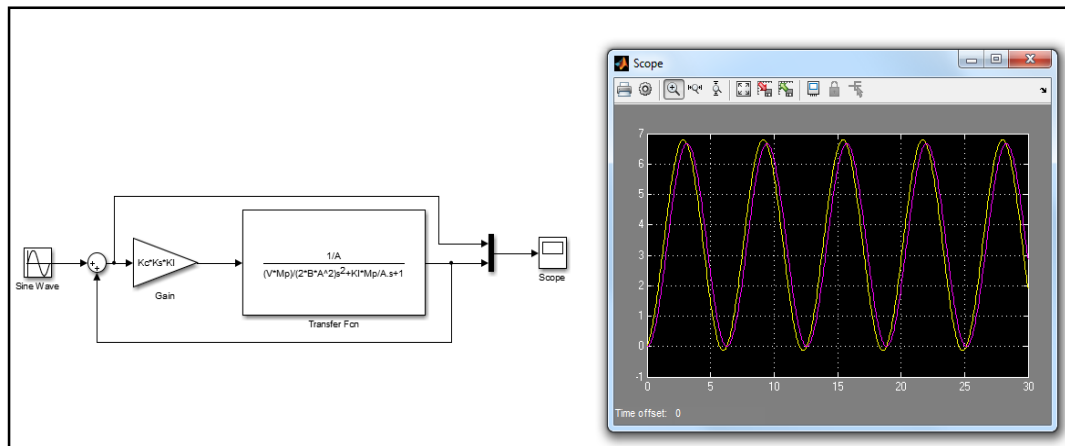


Figura N°33; Respuesta de la evaluación del sistema propuesto por Blondet y C. Spzarza

Fuente: Propia

Se programó en el Simulink el controlador de la mesa mediante un servo-controlador por desplazamiento, utilizando dos fuentes, tanto senoidal como constante, el cual se puede observar en la Figura N°34.

Se identificó cierto desfase en el sistema, el cual puede modificarse cambiando los valores de las ganancias en la servo-válvula.

En la Figura N°35 se puede observar el comportamiento del sistema al someter el simulador al controlador programado en el Simulink.

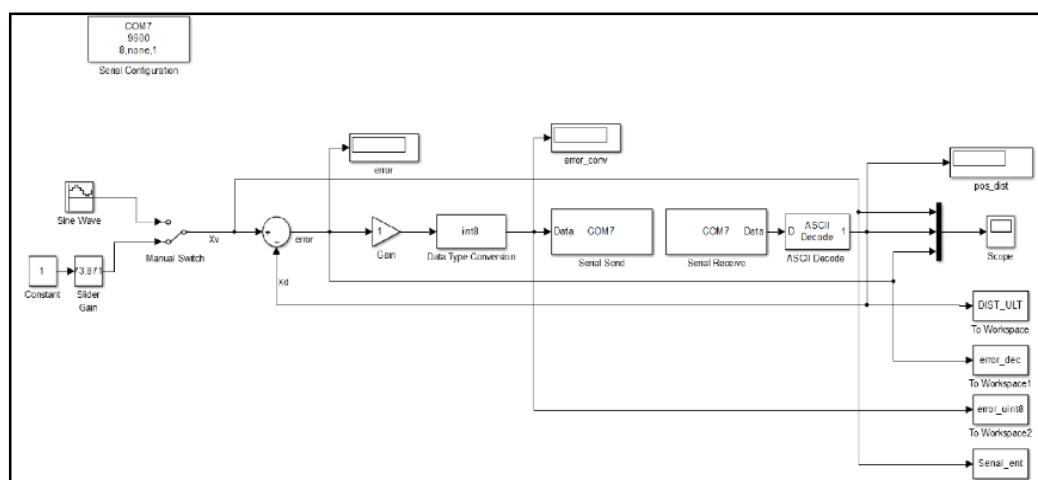


Figura N°34: Diagrama de control de Matlab- Simulink para el control del simulador

Fuente: Elaboración Propia

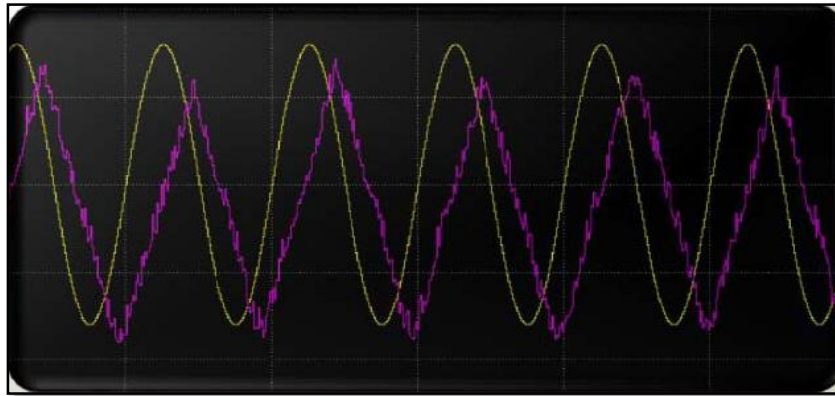


Figura N°35: Respuesta del sistema utilizando el controlador programado en el Simulink/Matlab

Fuente: Elaboración Propia

Para este estudio, se realizó un controlador en cascada utilizando las variables de desplazamiento y aceleración como variables de realimentación del sistema. El diagrama de bloques de la propuesta del controlador se puede observar en la Figura N°36.

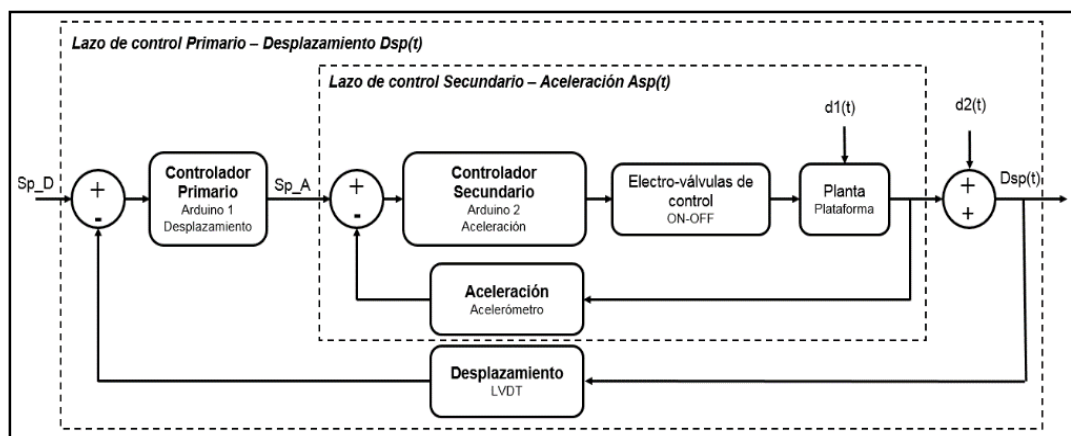


Figura N°36: Diagrama de bloques del controlador Cascada – Desplazamiento - Aceleración

Fuente: Elaboración Propia

Se programó en el Simulink un controlador en cascada de la mesa mediante un servo-controlador por desplazamiento, basado en el diagrama de bloques general, el controlador del sistema se puede observar en la Figura N°37.

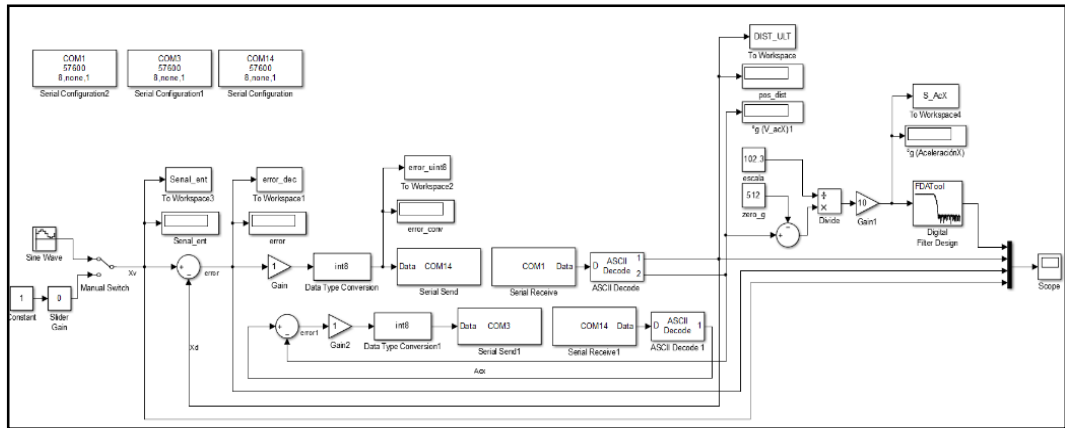


Figura N°37: Diagrama del controlador en cascada del Matlab – Simulink para el control del simulador

Fuente: Elaboración Propia

De esta manera se realizó el comportamiento del nuevo servo-controlador, obteniéndose una mejor respuesta frente al cambio de frecuencia. Pero generándose picos en la señal realimentada. Esta respuesta se muestra en la Figura N°38

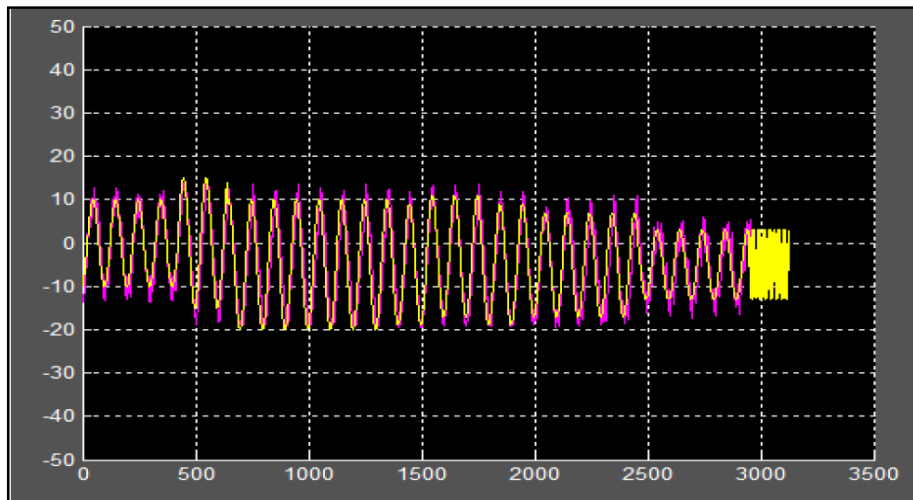


Figura N°38: Respuesta del sistema utilizando el controlador en cascada programado en Simulink/Matlab

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Funcionamiento y configuración del sistema de control

Se define un valor de referencia (Setpoint - X_v) para probar dicho sistema, para esto se utiliza una señal sinodal donde se puede modificar los parámetros de amplitud y frecuencia mientras esté en funcionamiento el simulador de sismos, a su vez se puede utilizar una constante y un Slider Gain el cual permite controlar mediante un slider (Entrada variable) la posición de la mesa y el lazo de control para así analizar la salida del sistema.

El error del sistema en el lazo de control se encuentra definido por la comparación de la señal comando (entrada - X_v) y la respuesta en desplazamiento que genera la mesa (salida - X_d).

Para la comunicación entre el Arduino y el Matlab - Simulink se utiliza el cuadro de configuración serial el cual tal como se muestra en la Figura N° 39, es con el puerto COM 'X' el cual se define el puerto en el que está siendo reconocida la tarjeta del Arduino, en este caso el COM 7.

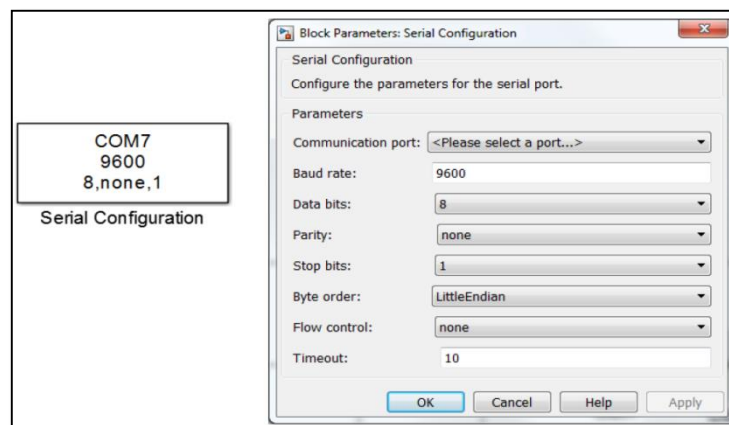


Figura N°39: Bloque de Parámetros de la Configuración Serial

Fuente: Elaboración Propia

El cual se encuentra configurado de la siguiente manera:

- Communication port: Se agrega el 'COM' en el que se encuentre reconocido la placa de Arduino Uno.
- Baud rate: La velocidad en baudios (bits/seg) por el cual se realiza la comunicación serial con la tarjeta diseñada.

- Data bits: El número de bits por transmitir en este caso es de 8 bits.
- Parity: Se especifica cómo se desea comprobar los bits de paridad en los bits que son transmitidos a través del puerto serie.
- Stop Bits: Se especifican el número de bits utilizados para indicar el final de un Byte.
- Flow Control: Especifica el proceso de administración de la velocidad de transmisión de datos en su puerto serie.
- Timeout: Especifica la cantidad de tiempo que el modelo deberá esperar por la duración de la información durante paso a paso de la simulación.

La data de desplazamiento, será recibida a través del bloque Serial receive, tal como se muestra en la Figura N°40, en la cual se grafican todas las señales en el Scope y se almacenan en los bloques de To Works pace.

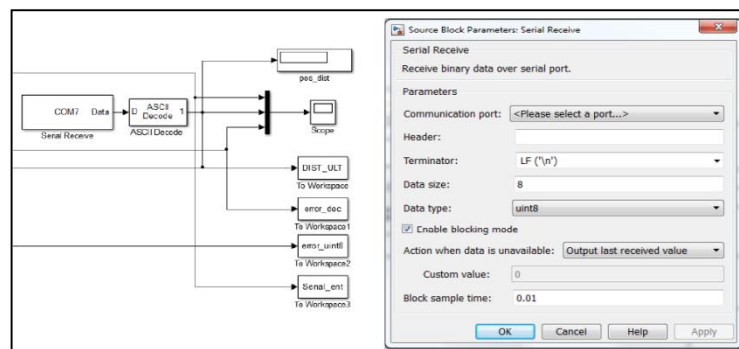


Figura N°40: Bloque de parámetros del receptor Serial

Fuente: Elaboración Propia

Se realiza la configuración en el bloque del 'Serial Receive' en la sección de los parámetros.

- Communication port: En este bloque se especifican los datos que marca el final de su bloque de datos. Se eligió el puerto 'COM' que tenga reconocido el Arduino para la comunicación entre el simulink y la tarjeta.
- Terminator: Indica el final del bloque de datos y la simulación tendrá en cuenta todos los datos que se produzcan después del terminador como un nuevo bloque de datos. Los datos del terminador no se envían al puerto de salida. Sólo los datos que se producen entre el encabezado y el terminador se envían al puerto de salida:

- CR ('\r') – Retorno de Carro
 - LF ('\n') – Línea de Alimentación – Esta opción es elegida para el desarrollo del proyecto
 - CR/LF ('\r\n')
 - NULL ('\0')
- Data Size: Especifica el Tamaño de los datos de salida o el número de valores que se deben leer en cada paso de tiempo de la simulación. El tamaño de data de este campo por predeterminado es [1 1]. Para la evaluación de este caso solo será una variable [1]. Por qué recibiremos un solo dato por serial receiver.
 - Data Type: Especifica el tipo de datos de salida. Pueden ser:
 - Single
 - Double
 - Int8
 - Uint8 (default) – Valores de 0 a 255 dentro de rango de valores máximo y mínimo
 - Uint16
 - Int32
 - Uint32
 - Byte order: Cuando se especifica un tipo de datos distinto de int8 o uint8, se puede especificar el orden de los bytes del dispositivo para los datos binarios.
 - Action when data is unavailable: Se especifica la acción a realizarse en el bloque cuando los datos no están disponibles son:
 - Salida del último valor recibido – El bloque devolverá el valor que recibió en el paso de tiempo anterior cuando no recibe dato en el tiempo actual. Este valor esta seleccionado de forma predeterminada. Esta opción será elegida para evitar que se detenga la obtención de datos por parte del Arduino.
 - Valor personalizado de salida – El bloque devolverá cualquier valor definido por el usuario cuando no reciba datos actuales, se puede definir el valor personalizado en el campo: VALOR PERSONALIZADO.

- Error – El bloque devolverá un error cuando no reciba datos actuales, esta opción no está disponible sino selecciona el *modo de bloqueo*.

El bloque de conversión de tipo de datos convierte una señal de entrada de cualquier tipo de datos Simulink® en el tipo de datos que especifique. La entrada puede ser cualquier señal real o de valor complejo. Si la entrada es real, la salida es real. Si la entrada es compleja, la salida es compleja. El bloque de parámetros de configuración se puede observar en la Figura N°41.

Dentro de los parámetros definimos lo siguiente:

- Output minimum: El valor mínimo de adquisición de datos recibido por el Arduino en este caso el valor mínimo del BIS = 0.
- Output Maximum: El valor máximo de adquisición de datos recibido por el Arduino, en este caso el valor máximo del BIS = 10
- Output Data Type: Especifica el tipo de datos de salida
- Input and output to have equal: Especifique si el valor del mundo real (RWV) o el entero almacenado (SI) de la entrada y la salida deben ser los mismos. Consulte Descripción en la página de referencia del bloque de conversión de tipo de datos para obtener más información sobre estas opciones.
- Integer reounding mode: Especifique el modo de redondeo para las operaciones de punto fijo.

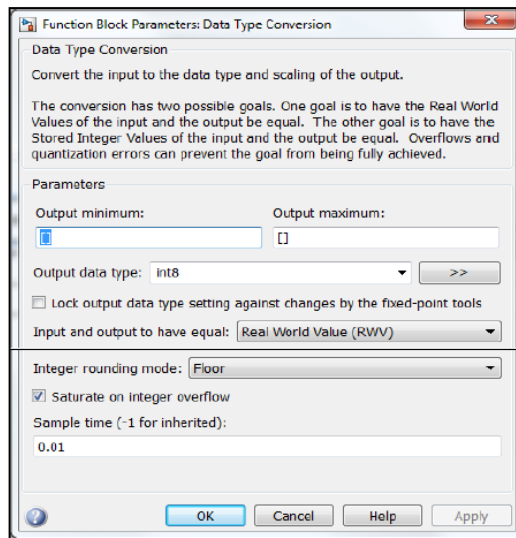


Figura N°41: Bloque de parámetros del tipo de conversión de datos

Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenido la conversión de datos se procederá a enviar el valor por el puerto COM serial, para esto configuramos el bloque 'Serial Send' que se puede observar en la Figura N°42. La configuración se realiza de la siguiente manera:

- Communication port: El puerto COM del Arduino
 - Header: Se especifican los datos suplementarios que se colocarán al principio de su bloque de datos. El bloque Enviar agrega el encabezado. De forma predeterminada, se especifica ninguna o ninguna cabecera. Cualquier cosa introducida en el encabezado se trata como un carácter. Si desea especificar números, debe utilizar los +1140caracteres ASCII correspondientes para ellos. Por ejemplo, para especificar [40 41], puede introducir () en el campo. Teniendo en cuenta que las comillas simples también se tratan como caracteres. Puede utilizar los caracteres ASCII correspondientes a los números entre 32 y 126.
 - Terminator: CR('\r')
- De esta manera, al inicializar todos los bloques y teniendo guardada solo la programación IDE en el Arduino, es que se puede inicializar la simulación desarrollada, desde el entorno Simulink, permitiendo obtener datos y realizando un control en tiempo real.

Dato: Para que se pueda realizar la simulación es necesario tener todos los bloques a un tiempo de muestra (simple time) a 0.01, o al valor que se decida, para la ejecución del proyecto.

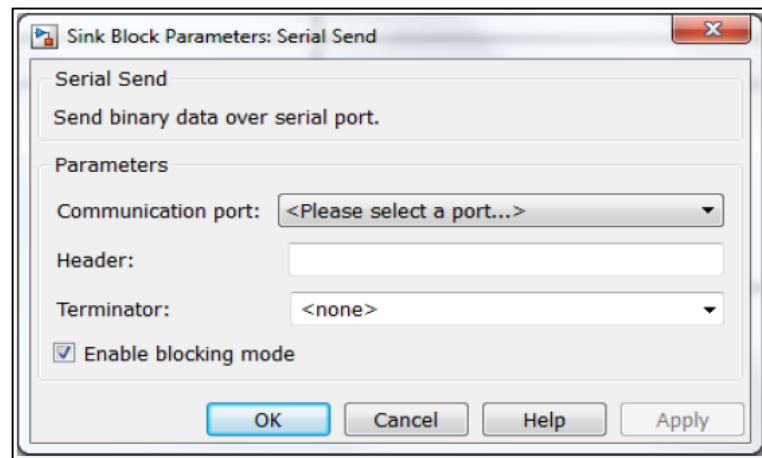


Figura N°42: Bloque de parámetros del Serial Send.

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Descripción del Sistema Electrónico

El sistema electrónico está relacionado directamente a la tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560 y sus especificaciones se muestran a continuación:

4.3.1 Alimentación del Arduino Mega 2560

La alimentación de la tarjeta de Arduino es uno de los puntos más importantes para el buen funcionamiento de los sistemas que se busca controlar. Aquellos proyectos con Arduino que incluyan elementos que consuman una intensidad superior a 200 mA (motores, relés, electroválvulas, etc...) se verán directamente impactados por la alimentación eléctrica de la placa. Para energizar a la tarjeta se tienen dos posibilidades: Se muestra en la Figura N° 43 la placa del Arduino Uno.

Mediante el cable USB conectado a un ordenador:

- Cada pin proporciona 40 mA.
- El límite proporcionado por el USB es de 500 mA en total.

- Utilizando una fuente de alimentación externa conectada al Jack de Arduino (fuente de voltaje, adaptador de corriente, batería o porta pilas).
- El voltaje recomendado de la fuente externa está entre 9 y 12 V.
- La intensidad máxima que puede entregar Arduino a los actuadores que se desee controlar (servos, motores, relés,) es de 1A, aunque una exposición prolongada a esta corriente puede estropear la placa. Lo recomendable es 800 mA.
- El pin serigrafiado con Vin proporciona directamente el voltaje de la fuente conectada al Jack de Arduino (menos la caída de tensión del diodo de protección), desde ese pin podemos sacar un cable y alimentar a los actuadores que necesitemos. Por ejemplo, si se alimenta con una pila externa de 9 V conectada al Jack, en el pin Vin tendremos aproximadamente 9 V (hay que restar la caída de tensión del diodo de protección). Además, en los pines 5V y 3.3V dispondremos también de dichos voltajes, aunque la fuente externa sea de 9V.

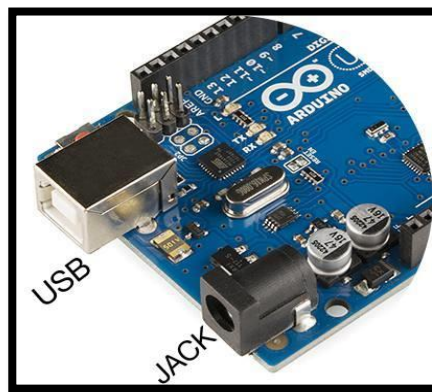


Figura N°43: Placa del Arduino Uno
Fuente: Internet, 2016

4.3.2 Entorno de programación del Arduino

El entorno de desarrollo Arduino (IDE, Integrated development environment) está constituido por un editor de texto para escribir el código, un área de mensajes, una consola de texto, una barra de herramientas con botones para las funciones comunes, y una serie de menús. Además, la conexión, por USB, con el hardware de Arduino para cargar los programas y comunicarse con ellos.

Arduino utiliza para escribir el código fuente o programa de aplicación lo que denomina "sketch" (programa). Estos programas son escritos en el editor de texto. Existe la posibilidad de cortar/pegar y buscar/remplazar texto. En el área de mensajes se muestra información mientras se cargan los programas y también muestra errores. La consola muestra el texto de salida para el entorno de Arduino incluyendo los mensajes de error completos y otras informaciones. La barra de herramientas permite verificar el proceso de carga, creación, apertura y guardado de programas, y la monitorización serie.

Se encuentran otros comandos en los cinco menús: File, Edit, Sketch, Tools, Help, tal como se muestra en la Figura N°44, Los menús son sensibles al contexto, lo que significa que estarán disponibles sólo los elementos relevantes para la tarea que esté realizando en ese momento.

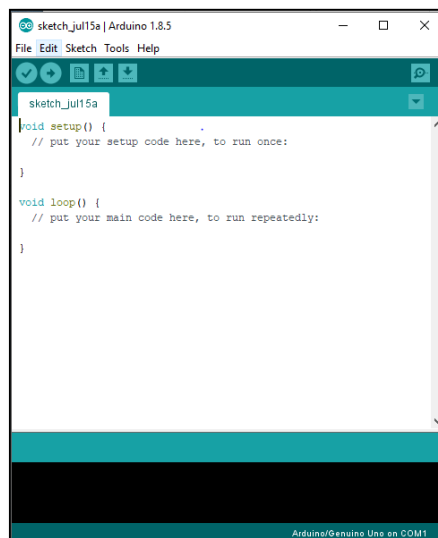


Figura N°44: Entorno de Programación del Arduino IDE

Fuente: Internet, 2015

Las partes principales de un programa hecho en Arduino son: Bloque de inclusión de módulos y declaración de variables, bloque de configuración void setup () donde se indica el modo de funcionamiento de los pines (entrada y salida), comunicación serie, etc... Y bloque de ejecución continua void loop (), en este bloque se incluyen las acciones que queremos que realice el programa.

Se ejecutará línea a línea de forma secuencial y continua. Cuando llegue a la última instrucción incluida en la función loop () volverá a ejecutar la primera y continuará en un bucle infinito.

Sólo es necesario que esté conectado al ordenador mediante el USB para cargar los programas o para visualizar en tiempo de ejecución datos del programa mediante la consola serie. El ordenador proporciona la energía eléctrica suficiente para que funcionen los programas, pero una vez cargado el programa en la memoria del microcontrolador de Arduino se puede desconectar del USB y alimentar a la tarjeta mediante una fuente externa mediante el Jack de alimentación con un margen de (5 a 20 Voltios). El programa cargado en Arduino queda grabado permanentemente, aunque cese el suministro eléctrico.

4.3.3 Protocolos de Comunicación

Arduino cuenta con múltiples protocolos de comunicación disponibles para la utilización del usuario: SPI (Serial Peripheral Interface), I2C (Inter-Integrated Circuit), UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), etc.

De este listado de protocolos, los que se ha utilizado dentro de la ejecución de esta tesis UART.

a) Protocolo UART

Este protocolo es una forma de comunicación serial ya que la información es transmitida por bits de manera secuencial. La configuración para la comunicación UART es bastante sencilla: una línea para transmitir información (TX) y una línea para recibir información (RX). En conjunto ambas líneas forman un puerto serial por el cual la comunicación puede ocurrir.

El termino UART, en realidad, se refiere al hardware que controla el empaquetado e interpretación de los datos seriales. Dentro de este hardware opera otro protocolo serial, el RS-232, conocido por ser usado dentro de las comunicaciones seriales (vía USB) hacia las computadoras en general. Sin

embargo, es común denominar como protocolo a este colectivo de hardware ante la función que desempeña dentro de la tarjeta de desarrollo.

El protocolo es llamado asíncrono debido a que la comunicación no depende de una señal de reloj sincronizada entre los dispositivos que tratan de establecer la transferencia de datos. Ya que la velocidad de comunicación no está definida por una señal constante, el dispositivo emisor no puede asegurar que el dispositivo receptor obtenga los datos de manera correcta. Es por esto que la información es comprimida en paquetes de tamaño único, asegurando así la transferencia de datos

La Figura N°45, muestra un gráfico detallando el empaquetado que recibe la información transmitida:

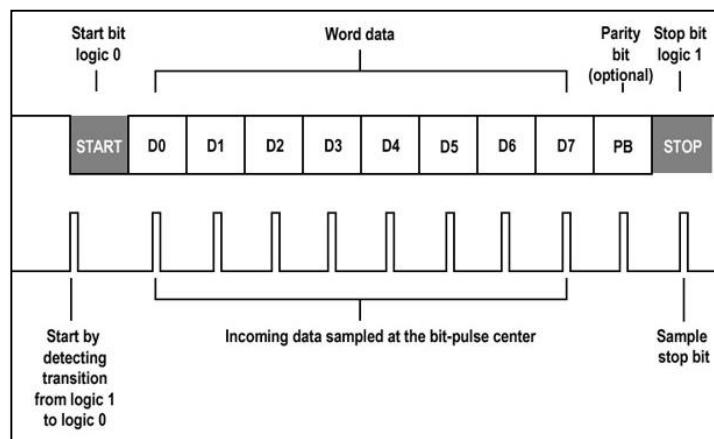


Figura N°45: Empaquetado de la información transmitida a través del protocolo UART

Fuente: Internet, 2015

Como se mencionó anteriormente, los dispositivos que se comunican a través del protocolo UART envían paquetes de tamaño predefinido. Estos contienen información adicional indicando el inicio y fin del mensaje y confirmación de la correcta recepción del mensaje. Por ejemplo, para iniciar la comunicación, el dispositivo emisor envía una señal baja a través de la línea de transmisión. A largo plazo, esto resulta en una transferencia más lenta en comparación con una comunicación síncrona debido a que solo parte del mensaje transmitido es usado para la aplicación misma.

La ventaja de implementar una comunicación serial UART en plataformas como Arduino, es que el usuario no debe manejar directamente la comunicación a nivel de bits. Es así que el usuario dispone de librerías de mayor nivel, siendo estas el nivel de entrada para el uso de esta comunicación.

4.3.4 PLC Siemens S7 1200

El controlador modular SIMATIC S7-1200 es el núcleo de todo el sistema, debido a su alto rendimiento para tareas de automatización. El PLC se puede observar en la Figura N°46.

El PLC ofrece al sistema:

- Alta Capacidad de procesamiento, por sus altas tasas de bits dedicado para el cálculo.
- Interfaz Ethernet / Profinet, integrado para conexiones de configuración por software.
- Los bloques de funcionamiento para el control de ejes conforme al PLC open.
- Su programación es fácil y se realiza en software STEP7 Basic v13 para la configuración y programación no solo del S7-1200, sino de manera integrada los paneles de la gama Simantic Basic Panels.

Este sistema del PLC viene equipado con diferentes modelos de CPU, los cuales te permite expandir de acuerdo a las necesidades y requerimientos de los sistemas y actualizaciones.



Figura N°46: PLC Siemens S71200

Fuente: Internet, 2016

Este modelo de PLC, permite reemplazar los dispositivos eléctricos como contactores y relevadores, de manera que, para protección y control a nivel de potencia, es una buena opción para el trabajo con las electroválvulas del sistema. Las cuales mediante sus activaciones permiten el desplazamiento del actuador, generando así el movimiento de la plataforma metálica.

Entre sus especificaciones se tiene:

- Memoria de Trabajo de 25KB
- 8 entradas y 6 salidas digitales
- 2 entradas analógicas
- Tamaño de imagen para proceso de 1024 Bytes
- Hasta 2 Módulos de ampliación
- Alimentación de 24Vdc
- Conmutador con 4 puertos administrados que le permite conectar hasta 3 dispositivos adicionales de Ethernet a la estación de control S7-1200.

Su programación se realiza mediante el STEP 7- Simantic-S7, el cual es un software que nos permite programar y realizar el control de autómatas según la norma IEC-61131-3.

4.4 Resultados del sistema de control

Se realizaron las primeras pruebas en el simulador con y sin carga sobre la plataforma, para poder evaluar su comportamiento, estabilidad, aceleración máxima tal como se muestra en la Figura N°47, donde se obtuvieron los siguientes resultados al realizar la simulación.

Tal como se muestra en la Figura N°48, el sistema realizaba un seguimiento de la señal comando (señal amarilla) a través de su realimentación (señal magenta), una señal obtenida por sensores ultrasonidos que determinaban el desplazamiento de la plataforma. A su vez se pudo visualizar el rango de errores de seguimiento del sistema (señal celeste).

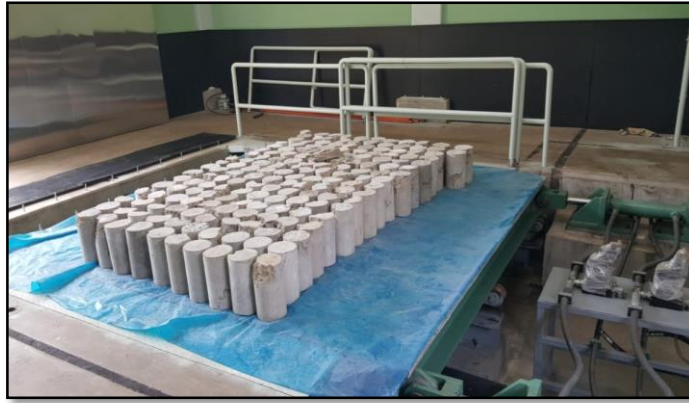


Figura N°47: Ensayos en el sistema electrohidráulico de simulación sísmica

Fuente: Elaboración Propia

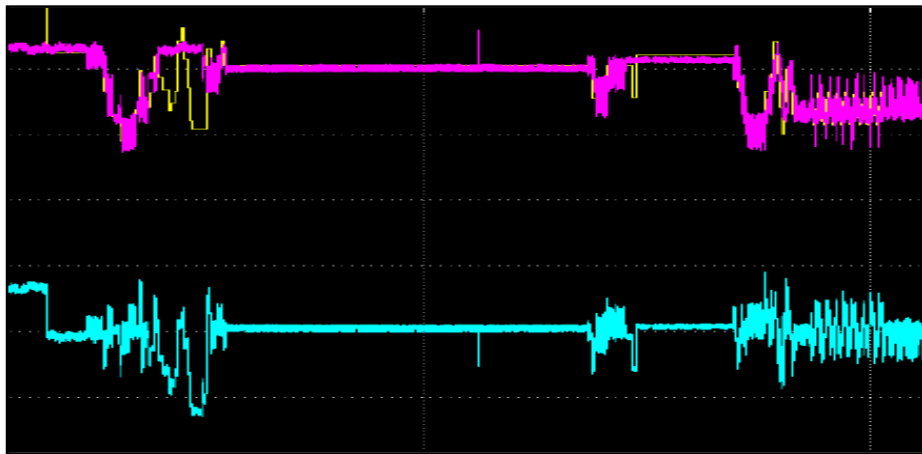


Figura N°48: Respuesta del sistema de simulación sísmica de los ensayos

Fuente: Elaboración Propia

Entre las respuestas del sistema cabe destacar que este presenta un error muy cercano al 0 (cero), cuando la señal comando es constante o con variación en escalón, y un error elevado cuando la señal es variante (señal senoidal con frecuencias variables).

Como se observa en la Figura N°49 a medida que la frecuencia de la señal comando aumenta, la señal de realimentación no logra recrearla completamente, esto es debido a que el sistema se encuentra limitado por su diseño hidráulico el cual puede llegar hasta un máximo de frecuencia, hasta que el desplazamiento del sistema sea muy próximo a cero (no hay desplazamiento).

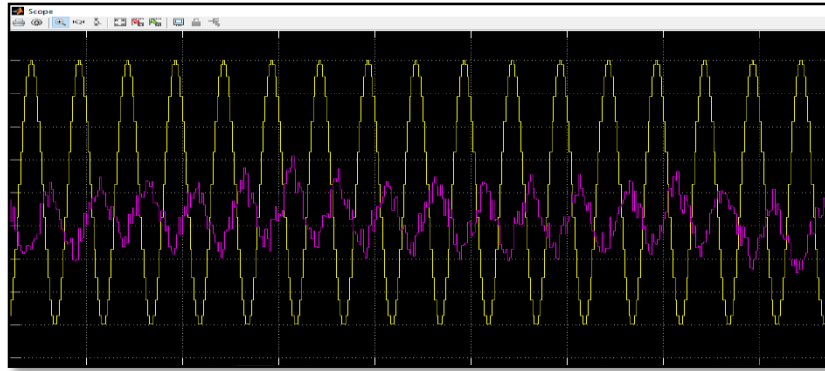


Figura N°49: Respuesta del sistema ante una señal senoidal a una frecuencia de 8Hz

Fuente: Elaboración Propia

Como se pueden observar en las Figuras N°50 y Figura N°51, la respuesta del sistema ante una señal impulso de escalón, presenta un tiempo de respuesta optimo al cual una vez que logra alcanzarlo se mantiene oscilando generándose una inestabilidad con un error próximo a cero, esto debido al tipo de actuador ON-OFF el cual genera que exista un error.

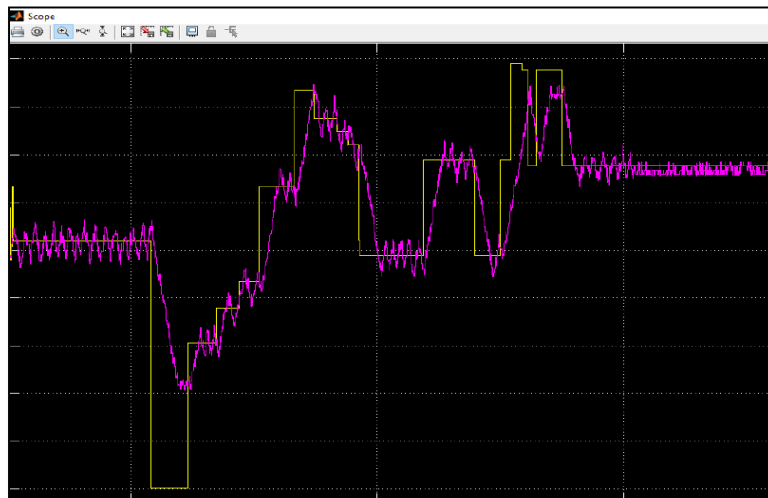


Figura N°50: Respuesta del sistema ante señales de impulso de escalón

Fuente: Elaboración Propia

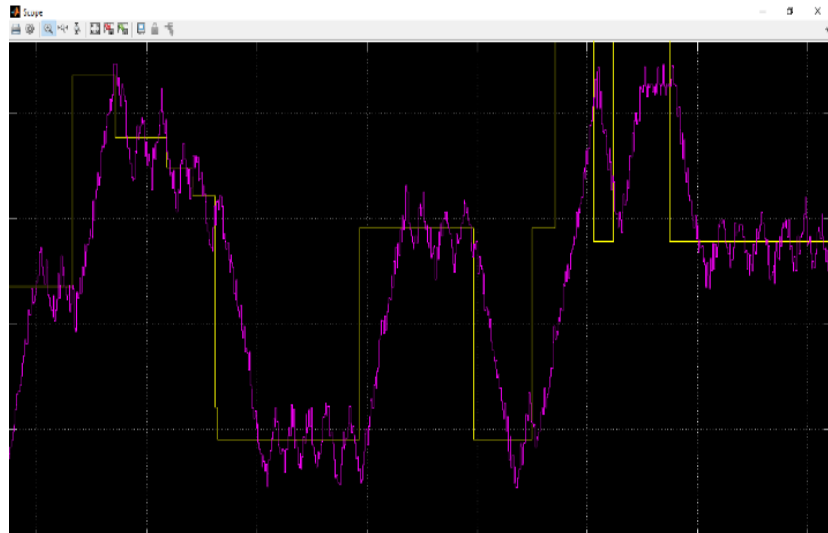


Figura N°51: Observación de la respuesta del sistema ante impulsos de escalón (Posición)

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

- A. Se logró diseñar un controlador en cascada para un simulador electrohidráulico sísmico uniaxial, utilizando el software Matlab y Arduino, para realizar simulaciones sísmicas de ensayos dinámicos.
- B. Se logró diseñar el controlador digital para la interacción con los actuadores hidráulicos, mediante una aplicación software en el entorno Simulink del Matlab, integrando el control del funcionamiento de sistemas electrohidráulicos. Por medio de la interfaz serial y el protocolo UART, se comprobó su funcionamiento para una comunicación entre los módulos de hardware y los entornos software.
- C. Se demostró que es posible diseñar una interfaz gráfica en el entorno de GUIDE del Matlab sincronizado con el Simulink para controlar el funcionamiento de prototipos electrohidráulicos, y realizar la medición de los sensores en la realización de la prueba.
- D. Los ultrasonidos permiten un buen control de la mesa, pese al ruido y las vibraciones del simulador, sin embargo, su linealidad no es precisa, y en ocasiones se distorsiona la señal al brindarnos un dato con un error elevado lo que genera la inestabilidad del sistema, por lo cual para este tipo de sistemas controlados, nos permite realizar el control hasta cierta frecuencia y luego se distorsiona la señal realimentada, generando conflictos con la señal de aceleración en su segundo lazo realimentado.
- E. El control con los sensores de desplazamiento lineal, LVDT, generaron una mejor respuesta en el sistema, tanto en estabilidad como en linealidad. Permittiéndonos realizar el control de la mesa a mayor frecuencia que en el caso del ultrasonido. Sin embargo, se comprobó que al aumentar las frecuencias de evaluación la linealidad del sensor comienza a decaer y se pierde la estabilidad del sistema
- F. Al realizar pruebas con carga muerta (masa de evaluación = 0), se logró llegar a una frecuencia de hasta 8 Hz con el ultrasonido sin caer en inestabilidad, al

momento de subir la frecuencia se podía apreciar como la inestabilidad alteraba la respuesta del sistema.

- G. Al realizar pruebas con carga muerta (masa de evaluación = 0), se logró llegar a una frecuencia de hasta 10 Hz con el sensor de desplazamiento lineal LVDT, sin caer en inestabilidad y manteniendo su linealidad. Al momento de superar los 10 Hz, la linealidad de la medida decaía lo que generaba inestabilidad en el sistema.
- H. Al realizar pruebas con carga (masa de evaluación > 0) tanto en el caso de evaluaciones con ultrasonidos como con el LVDT, a medida que la masa de evaluación aumentaba, la frecuencia del simulador bajaba proporcionalmente
- I. Al realizar pruebas de frecuencia con el sistema, se encontró que a medida que las frecuencias de evaluación aumentaban, el desplazamiento de la esa se hacía mínimo, comprobándose que a medida que la frecuencia aumenta el desplazamiento del sistema se aproximaba a cero.
- J. Se comprobó que al momento de realizar las evaluaciones con carga sobre la plataforma, las aceleraciones que se generan en la plataforma no eran las mismas que las que se generaban en la estructura, debido a que en la plataforma solo se registraban aceleraciones en un solo sentido, mientras que en la estructura se registraron aceleraciones en las 3 direcciones (X, Y, Z).

RECOMENDACIONES

- A. Para poder realizar una evaluación con el simulador sísmico es necesario que la estructura a evaluar, se encuentre fija a la plataforma de ensayo, mediante pernos metálicos los cuales deben ser capaces de soportar esfuerzos de tracción y corte. para poder garantizar que las respuestas del sistema obtenida de los sensores de evaluación sea la ideal, o la más aproximada al valor ideal.
- B. Utilizar los sensores de carácter lineal y de mayor precisión, dan una mejor performance al sistema, a diferencia de los sensores de ultrasonido y acelerómetros de bajo consumo los cuales generaban demasiado ruido de realimentación, lo cual generaba inestabilidad en el sistema.
- C. El sistema de alimentación hidráulica implementado permite realizar los desplazamientos necesarios para la evaluación de estructuras ante la recreación de condiciones sísmicas en el Perú. Para ello es recomendable contar con sistemas de fácil uso
- D. El Arduino Mega cuenta con conversores ADC (Analogic to Digital Converter) de una resolución de 10 bits y hasta un máximo de 5 voltios, lo cual no nos brinda mucha resolución de la toma de datos. Es por esto que se recomienda utilizar dispositivos y equipos que cuenten con una resolución de más de 15 bits y con un rango de lecturas de 0 a 10 voltios.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- American Society for Testing and Materials. ASTM International. (2015) Norma ASTM D2216 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. Estados Unidos.
- Ardilla, W., Chaves, J., & Quintero, E. (2009, agosto). Simulación de un sistema masa resorte amortiguador con circuitos electrónicos. *Scientia Et Technica*, 42, pp.220-225.
- Bernal, N., Porras, P., & Carrillo J. (Setiembre del 2012). Automatización de un simulador uniaxial para estudios experimentales en ingeniería sismo-resistente. *First International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology AMDM 2012*. Congreso llevado a cabo en Pereira, Colombia.
- Blondet, M., & Esparza, C. (1988, mayo). Analysis of shaking table-structure interaction effects during seismic simulation tests. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 16, pp.473–490.
- Coral, H. (2010). *Control Robusto Activo para la Minimización de Vibraciones en una Estructura Flexible de Tres Pisos bajo Excitaciones Sísmicas* (Tesis de maestría). Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Coral, H. (2012, octubre 04). Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos estructurales a pequeña escala. *Ingeniería y Competitividad*, 12, pp.95-115.
- Instituto Geofísico del Perú. (2007). El terremoto de Pisco (Perú) del 15 de agosto del 2007. Perú.
- Malheiro, J. (2014). *Controlo e supervisão funcional de um simulador de vibrações multiaxial* (Tesis de maestría). Universidade Do Porto, Porto, Portugal.
- Mauricio, N. (2013). *Automatización del Equipo de Simulación Sísmica Uniaxial del Laboratorio de Estructuras* (Tesis de grado). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Roldán, J. (1991). *Neumática, Hidráulica y electricidad aplicada*. España: Paraninfo.
- Román, A. (Julio del 2010). Design and Construction of a Module for the Dynamic Excitation and Vibrational Analysis of Structures. *IEEE R8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering SIBIRICON 2010*. Congreso llevado a cabo en Siberia, Rusia.
- Ogata, K. (2002). *Modern Control Engineering*. EE.UU: Prentice Hall.

ANEXOS

Anexo N°1: Programación del Matlab – Guide

```
unction varargout = SIGNAL(varargin)
% SIGNAL MATLAB code for SIGNAL.fig
%   SIGNAL, by itself, creates a new SIGNAL or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = SIGNAL returns the handle to a new SIGNAL or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   SIGNAL('CALLBACK', hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in SIGNAL.M with the given input arguments.
%
%   SIGNAL('Property','Value',...) creates a new SIGNAL or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before SIGNAL_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to SIGNAL_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help SIGNAL
% Last Modified by GUIDE v2.5 21-Oct-2016 07:26:44
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @SIGNAL_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @SIGNAL_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code
```

```

% -----
% --- Executes just before SIGNAL is made visible.
function SIGNAL_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to SIGNAL (see VARARGIN)
% Choose default command line output for SIGNAL
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
if nargin == 3,
    initial_dir = pwd;
elseif nargin > 4
    if strcmpi(varargin{1}, 'dir')
        if exist(varargin{2}, 'dir')
            initial_dir = varargin{2};
        else
            errordlg({'Input argument must be a valid',...
                'folder'}, 'Input Argument Error!')
            return
        end
    else
        errordlg('Unrecognized input argument',...
            'Input Argument Error!');
        return;
    end
end
% Populate the listbox
% -----
% UIWAIT makes SIGNAL wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
function load_listbox(dir_path, handles)
global loading
cd (dir_path)
dir_struct = dir(dir_path);
[sorted_names, sorted_index] = sortrows({dir_struct.name});
ind=[1 2];
sorted_names(ind) = [];
handles.file_names = sorted_names;
handles.is_dir = [dir_struct.isdir];
handles.sorted_index = sorted_index;
guidata(handles.figure1, handles)

```

```

set(handles.listbox1,'String',handles.file_names,'Value',1)
% -----
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = SIGNAL_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on signal press in SignalBut.
function SignalBut_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to SignalBut (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% --- Executes on signal press in ControlBut.
function ControlBut_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to ControlBut (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(SIGNAL,'Visible','off')
set(CONTROL,'Visible','on')
% --- Executes on signal press in DataBut.
function DataBut_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to DataBut (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(SIGNAL,'Visible','off')
set(DATA,'Visible','on')

% -----

% --- Executes on selection change in listbox1.
function listbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global loading
get(handles.figure1,'SelectionType');
index_selected = get(handles.listbox1,'Value');
file_list = get(handles.listbox1,'String');
loading = file_list{index_selected};

% -----

```

```

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns listbox1 contents as cell array
%     contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from listbox1
% -----
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listbox1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if     ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% -----
% --- Executes on button press in LoadBut.
function LoadBut_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to LoadBut (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global loading
global A
global A1
global A2
global A3
% -----
A = load(loading);
A1=A(:,1);
A2=A(:,2);
A3=A(:,3);
axes(handles.axes1);
plot(A), grid;
axes(handles.axes2);
plot(A1,'g'), grid;
axes(handles.axes3);
plot(A2,'r'), grid;
% -----
N=length(A2);      % Definimos la dimensión de este vector
Fs=100;
a2 = fft(A2,N);
Pyy = a2.*conj(a2)/N;
f = (Fs)*(0:N/2-1)/N;

```



```

axes(handles.axes4);
plot(f,Pyy(1:N/2),'y'), grid;
% -----
T = 1/Fs;          % Intervalo de muestreo
[s,I]=max(abs(A2)); % I=posicion del maximo
y1 = hilbert(A2);
y2 = sqrt(A2.*A2+y1.*conj(y1));
s3 = max(y2);
y2 = y2/s3;       % envolvente
comp = mean(y2(1:60));
for n = 10:I
    if y2(n) > 5.9*comp
        n;
        break
    end
end
for k = 1:n
    if y2(n-k)-y2(n-k-1)<0&y2(n-k)<0.015
        Ip = n-k;
        tp = (Ip)*T;
        break
    end
end
Ix = round((Ip+I)/2);
for n = Ix:I
    if y2(n) > 0.45
        n;
        break
    end
end
fprintf('%s%8.6f\n', ' Tiempo P = ',tp);
% Calculo de la fase S
for k = Ix:n+Ix
    if (y2(n+Ix-k)-y2(n+Ix-k-1)<0) & y2(n+Ix-k)<0.09
        Is = n+Ix-k;
        ts = (Is)*T;
        break
    end
end
fprintf('%s%8.6f\n', ' Tiempo S = ',ts);
% Plotear las gráficas
Y = fft(A2,N);
Pyy = Y.*conj(Y) / N;
f = (1/T)*(0:N/2)/ N;

```

```

N = 128;          % N = numero de puntos TRF
for k = 1:N
    y1(k) = A2(I-N/4+k);
end
Y = fft(y1,N);
Pyy = Y.*conj(Y) / N;
f = (1/T)*(0:N/2) / N;
delta_f = f(2)-f(1);
% -----
% Calculo del periodo
[amp_espectro,J] = max (abs(Pyy));
fs = delta_f*(J-1);
periodo = 1/fs;
% -----
% Calculo de la Magnitud
M=log10(s)+3*log10(8*(ts-tp))-2.92;
fprintf('%s%8.6f\n', ' Magnitud = ',M);
tpstr=num2str(tp);
tsstr=num2str(ts);
Mstr=num2str(M);
str0='CALCULO DE FASES,AMPLITUD Y PERIODO';
str1=strcat('Tiempo P',{' '},tpstr,{' '},'seg');
str2=strcat('Tiempo S',{' '},tsstr,{' '},'seg');
str3=strcat('Magnitud',{' '},Mstr,{' '},'Richter')
strg=[str0,' ',str1,str2,str3];
asx=strcat({' '},strg);
set(handles.edit1,'String',asx);
% -----
function set GlobalX(val)
global A
A = val;
function r = getGlobalx
global A
r = A;
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes4
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%     str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on key press with focus on edit1 and none of its controls.
function edit1_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see UICONTROL)
%   Key: name of the key that was pressed, in lower case
%   Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
%   Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% --- Executes on button press in ResetBut.
function ResetBut_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ResetBut (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
axes(handles.axes1);
plot(0), grid;
axes(handles.axes2);
plot(0), grid;
axes(handles.axes3);
plot(0), grid;
axes(handles.axes4);
plot(0), grid;
set(handles.edit1,'String',' ');
clear all
clc
% --- Executes on button press in DirectoryBut.
function DirectoryBut_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to DirectoryBut (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
folder_name = uigetdir('C:\Users\ADMIN\Documents\Matlab\Fincyt\1.4.- BASE DE
DATOS REGISTROS SISMICOS','Select Register Container Folder')

```

```
load_listbox(folder_name,handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

Anexo N°2: Hoja de Cálculos

Detalles del pistón y cálculos de operación del pistón.

Presión ejercida por la bomba [bar] - [Kgf/m²] $P := \frac{24.13166}{10^{-4}} = 2.413 \times 10^5$

Carrera máxima del vástago [m] $C_{\text{max}} := 0.1$

Metro Cúbico por segundo [GPM] - [Mcps] $M_{\text{cps}} := \frac{(1203.785410^{-3})}{60}$

Diámetro del cilindro externo [m] $D_{\text{ext}} := 5 \cdot 2.54 \cdot 10^{-2} = 0.127$

Diámetro del cilindro [m] $D_c := 4.22 \cdot 2.54 \cdot 10^{-2} = 0.107$

Diámetro del vástago [m] $D_v := 2 \cdot 2.54 \cdot 10^{-2} = 0.0508$

Largo del cilindro [m] $L_c := \frac{500.2}{1000} = 0.5$

Largo del vástago [m] $L_v := \frac{950}{1000} = 0.95$

Peso específico del acero [kg/m³] $\rho_A := 7850$

Extremo del pistón diferencial:

$d_1 := \frac{60}{1000} = 0.06$ $L_1 := \frac{6}{1000} = 6 \times 10^{-3}$

$d_2 := \frac{70}{1000} = 0.07$ $L_2 := \frac{330}{1000} = 0.33$

$d_3 := 4.13 \frac{25.4}{1000} = 0.105$ $L_3 := \frac{10}{1000} = 0.01$

Fórmulas de cálculo de pistón Diferencial

$F_c := P \cdot \pi \cdot \frac{(D_c^2 - D_v^2)}{4}$ $F_t := P \cdot \pi \cdot \frac{(D_c^2 - D_v^2)}{4}$ $d := \left(F_p \cdot \frac{4}{\pi \cdot P} \right)^{\frac{1}{2}}$ $Q := M_{\text{cps}}$

$A_c := \pi \cdot \frac{D_c^2}{4}$ $A_v := \pi \cdot \frac{D_v^2}{4}$ $DA := A_c - A_v$ $F_c K_n := \frac{F_c}{101.97}$ $F_t K_n := \frac{F_t}{101.97}$

$Vol_c := A_c \cdot C$ $Vol_v := DA \cdot C$ $Vol_v := A_v \cdot L_v$ $Vol_{cil} := A_c \cdot L_c$

$t_{cs} := \frac{Vol_c}{Q}$ $V_{ps} := \frac{C}{t_{cs}}$ $t_{cr} := \frac{Vol_v}{Q}$ $V_{pr} := \frac{C}{t_{cr}}$

$At_1 := \frac{\pi}{4} \cdot (d_3^2 - d_1^2) = 5.815 \times 10^{-3}$ $Vol_1 := At_1 \cdot L_1 = 3.489 \times 10^{-5}$ $P_1 := Vol_1 \rho_A = 0.274$

$At_2 := \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2) = 1.021 \times 10^{-3}$ $Vol_2 := At_2 \cdot L_2 = 3.369 \times 10^{-4}$ $P_2 := Vol_2 \rho_A = 2.645$

$At_3 := \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2) = 3.848 \times 10^{-3}$ $Vol_3 := At_3 \cdot L_3 = 3.848 \times 10^{-5}$ $P_3 := Vol_3 \rho_A = 0.302$

Peso Total de la tapa de acero (extremo del pistón [Kg] $PT := P1 + P2 + P3 = 3.221$

Para el cilindro:

$$Acext := \frac{\pi}{4} \cdot (Dext^2 - Dc^2) = 3.729 \times 10^{-3} \quad Vcext := Acext \cdot Lc = 1.865 \times 10^{-3}$$

$$Pcext := Vcext \cdot \rho A = 14.644$$

$$Efc = 1.168 \times 10^3$$

Fuerza a compresión [Kgf]

$$FcKn = 16.356$$

$$Ft = 1.668 \times 10^3 \quad Eft := Ft - .3Ft$$

Fuerza a tracción [Kgf]

$$FtKn = 16.356 \quad Eft = 1.168 \times 10^3 \quad Fton := Fc \cdot 2 = 3335.72 \quad [Kgf]$$
$$Fc = 1.668 \times 10^3$$

Relación a fuerza de compresión y a tracción de los cilindros hidráulicos

$$\text{Volumen de aceite necesaria para el cilindro [m}^3] \quad Volc = 1.341 \times 10^{-3} \quad \frac{Fc}{Ft} = 1$$

$$\text{Volumen de aceite necesaria para el vástago [m}^3] \quad Volv = 1.037 \times 10^{-3}$$

Diámetro mínimo necesario para aplicar una fuerza determinada del pistón [m]

$$\text{Area del cilindro [m}^2] \quad Ac = 0.008938$$

$$\text{Area del vástago [m}^2] \quad Av = 0.002027$$

$$\text{Diferencial de área [m}^2] \quad DA = 0.006912$$

$$\text{Tiempo de Carrera salida [s] \quad tcs = 0.177$$

$$\text{Velocidad del pistón de salida [m/s] \quad Vps = 0.847$$

$$\text{Tiempo de Carrera retorno [s] \quad tr = 0.137$$

$$\text{Velocidad del pistón de retorno [m/s] \quad Vpr = 1.095$$

$$\text{Peso del vástago [Kg] \quad PesoV := Volv \cdot \rho A = 15.115$$

$$\text{Peso del cilindro [kg] \quad PesoC := Volc \cdot \rho A = 35.097$$

$$\text{Peso total del pistón Diferencial x Pistón [Kg] \quad Volc = 1.341 \times 10^{-3}$$

$$PesoTot := (PT + Pcext + PesoV + PesoC) + .1 \cdot (PT + Pcext + PesoV + PesoC) = 74.884$$

$$Peso2Tot := PesoTot \cdot 2 = 149.769$$

Variación de la presión de aceite en sistemas cerrados

$$\text{Para aceites hidráulicos k aprox. } 0.67 \cdot 10^{-3} \text{ [1/K] \quad k := } 0.67 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Temperatura de ambiente [}^{\circ}\text{C] \quad Ta := } 25$$

$$\text{Temperatura máxima [}^{\circ}\text{C] \quad Tmax := } 38 \quad TmaxK := Tmax + 273$$

$$\text{Cambio de temperatura [}^{\circ}\text{K] \quad DT := TmaxK - TaK$$

$$\text{Diferencia de volumen por cambio de temperatura [cm}^3]$$

$$Vt := Volc \cdot k \cdot DT = 1.347 \times 10^{-5}$$

Anexo N°3: Detalles Bomba Hidráulica

Bomba de paletas constante

 RS 10335/10.05 1/22
 Reemplaza a: 11.02

Tipo PVV y PVQ

 Tamaños nominales 18 hasta 193
 Serie 1X
 Presión de servicio máxima 210 bar
 Cilindradas máximas 18 hasta 193 cm³

 Bombadoble_d_...
 Bomba doble
 tipo PVV21-1X/A15DD..

 H/A/D5769/97
 Bomba simple
 tipo PVV2-1X/A15D..

Indice

| Contenido | Página |
|--|--------|
| Características | 1 |
| Función, corte | 2; 3 |
| Símbolos | 3 |
| Código de pedido | 4; 5 |
| Datos técnicos | 6; 7 |
| Momentos de accionamiento, nivel sonoro | 8 |
| Potencia de accionamiento | 9 |
| Caudal desplazado, caudal de fugas | 10 |
| Dimensiones: | |
| • PVV / PVQ 1 | 11 |
| • PVV / PVQ 2; 4; 5 | 12 |
| • PVV / PVQ 2...K.. | 13 |
| • PVV / PVQ 4...K.. | 14 |
| • PVV / PVQ 5...K.. | 15 |
| • PVV / PVQ 21; 41; 42; 51; 52 | 16 |
| • PVV / PVQ 54 | 17 |
| Extremo de eje para tamaño constructivo 2 hasta 54 | 18 |
| Juego de montaje para bomba | 19 |
| Accesorios | 20 |
| Indicaciones de proyecto y puesta en marcha | 21 |
| Indicaciones de montaje | 22 |

 Informaciones sobre repuestos disponibles:
www.boschrexroth.com/spc

Características

- cilindrada constante
- elevada vida útil de rodamientos por eje hidráulicamente descargado
- poco desgaste por paletas hidráulicamente descargadas
- bajo ruido de servicio
- de fácil mantenimiento por juego de montaje para bomba recambiable
- buen rendimiento
- posición seleccionable de la conexión de presión
- sentido de giro de accionamiento horario o antihorario
- eje de accionamiento opcionalmente cilíndrico o dentado
- Bomba doble:
- construcción muy compacta
- posición de las conexiones de presión seleccionable por separado



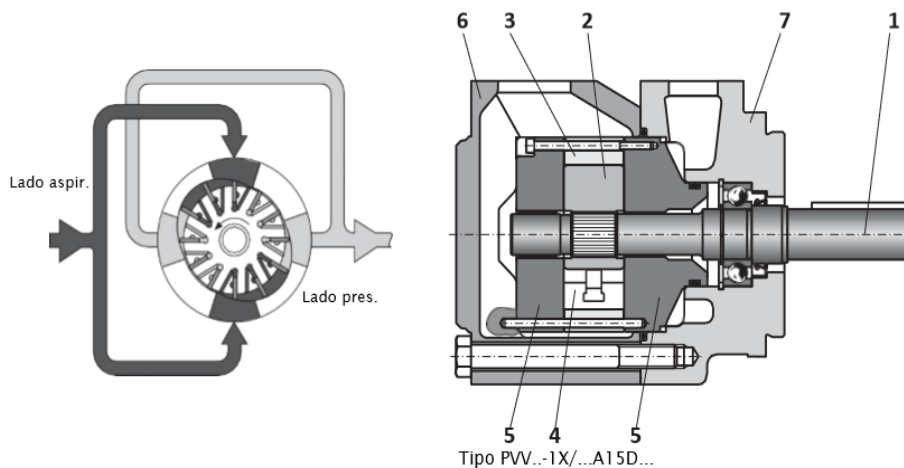
Función, corte

Las bombas hidráulicas tipo PVV y PVQ son bombas de paletas con cilindrada constante.

En el perfil dentado del eje de accionamiento (1) está ubicado el rotor (2) que circula dentro de un anillo estator (3). En las ranuras del rotor están las paletas (4) que, al girar el rotor, son oprimidas contra la superficie interior del anillo estator por la fuerza centrífuga. Las cámaras de desplazamiento se obturan lateralmente por las placas de mando (5). Por la forma excéntrica del anillo estator, se enfrentan dos cámaras de presión y dos de aspiración respectivamente, por lo cual el eje es

descargado hidráulicamente. De esta manera sólo debe transmitir el par de giro. Al recorrer el espacio de aspiración, las paletas se descargan parcialmente. Dicha descarga reduce el desgaste y garantiza un rendimiento elevado.

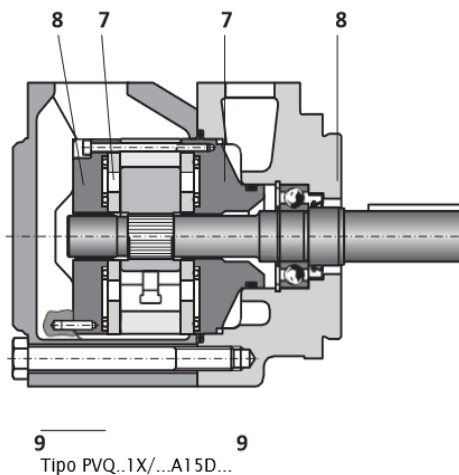
Simplemente quitando la tapa (6) el juego de bomba (compuesto de rotor, paleta, anillo estator y placas de mando) se puede extraer sin necesidad de quitar la carcasa (7) del soporte de la bomba. Esto agiliza los trabajos de mantenimiento y reparación.



Gracias a su construcción, el tipo PVQ se adecua especialmente para aplicaciones móviles.

La construcción especial de las placas de mando permite compensar una dilatación térmica del rotor y contrarrestar muy bien cambios de presión repentinos. Por la división de las placas de mando en discos flexibles (7) y placas cobertoras (8), se for-

man cámaras de contrapresión (9), balanceadas contra la presión en el desplazador. De esta manera se garantiza el juego óptimo entre rotor y placas flexibles, permitiendo rendimientos volumétricos excelentes.

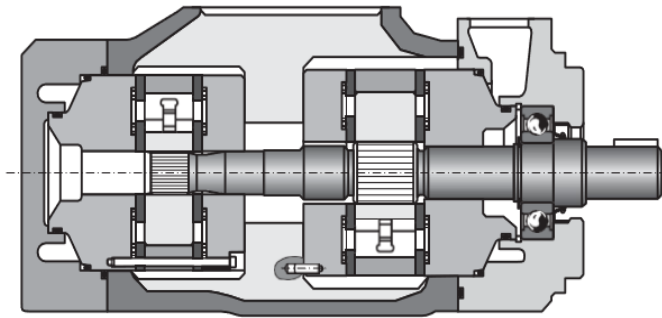


Función, corte

Las bombas dobles tipo PVV y PVQ se forman mediante montaje de dos juegos de montaje para bombas sobre un eje común. La entrada de aceite se efectúa a través de una conexión de aspiración común en la carcasa central (10). La salida de aceite se efectúa separadamente por ambos juegos de montaje para bombas. Para el juego de montaje para bomba anterior la conexión de presión se encuentra en la carcasa de la brida y

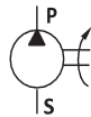
para el posterior, en la tapa.

El juego de montaje más grande siempre se encuentra del lado de la carcasa de la brida. Los juegos de montaje para bombas del mismo tamaño constructivo no se pueden realizar con bombas dobles.

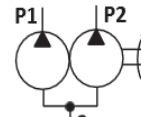


10

Símbolos



Bomba simple



Bomba doble

Código de pedido

| | | | | | | | | | | | |
|---|--|------|--|--|----|--|--|--|--|---|--|
| PV | | -1X/ | | | 15 | | | | | * | |
| <p>Tipo de bomba</p> <p>Versión industrial = V</p> <p>Versión móvil = Q</p> <p>Tamaño constructivo ver tabla página 5 (p.ej. bomba simple = 2, bomba doble = 52)</p> <p>Serie = 1X</p> <p>Serie 10 hasta 19 (10 hasta 19, medidas de montaje y conexión invariadas)</p> <p>Cilindrada ver tabla página 5 (p.ej. 55,2 cm³ = 055)</p> <p>Sentido de giro (mirando sobre el extremo del eje)</p> <p>horario = R</p> <p>antihorario = L</p> <p>Extremo de eje</p> <p>Eje de accionamiento cilíndrico (estándar) = A¹⁾</p> <p>Eje accion. cil. (versión reforzada) para tam. constr. 2 hasta B54 = B</p> <p>Eje estriado = J</p> <p>Conexión conducto</p> <p>Conex. aspir. y pres. según SAE, rosca de fijación UNC = 15</p> <p>Posición conex. presión en la brida (mirando sobre la tapa)</p> <p>arriba (0° de la entrada) = D</p> <p>derecha (90° a la derecha de la entrada) = R</p> <p>izquierda (90° a la izquierda de la entrada) = L</p> <p>abajo (180° de la entrada) = U</p> | | | | | | | | | | <p>Otros datos en texto complen.</p> <p>Arrastre</p> <p>sin desig. = sin</p> <p>arrastre</p> <p>K01 = 82-2, 16-4 (SAE-A, 9T)</p> <p>K02 = 101-2, 22-4 (SAE-B, 13T)</p> <p>K07 = 127-2, 32-4 (SAE-C, 14T)</p> <p>Versión de brida</p> <p>B = 101-2 (SAE-B); (tam. constr. 1; 2; 21)</p> <p>C = 127-2 (SAE-C); (tam. constr. 4; 5 y 41 - 54)</p> <p>Material de juntas</p> <p>M = juntas NBR</p> <p>V = juntas FKM</p> <p>Sólo para bombas dobles</p> <p>Pos. conex. presión en la tapa (mirando sobre la tapa)</p> <p>D = arriba (45° der. de la entrada)</p> <p>R = der. (135° der. de la entrada)</p> <p>L = izq. (45° izq. de la entrada)</p> <p>U = abajo (135° izq. de la entrada)</p> <p>D = arriba (0° de la entrada)</p> <p>R = der. (90° der. de la entrada)</p> <p>L = izq. (90° izq. de la entrada)</p> <p>U = abajo (180° de la entrada)</p> | |

Ejemplo de pedido

Bomba simple versión industrial (también versión móvil)

PVV 2-1X/055RA15DMB

Bomba doble: versión móvil (también versión industrial)

PVQ 52-1X/154-068RB15DDMC

¹⁾ no disponible para bombas con arrastre

Código de pedido (tamaño constructivo, cilindrada)

| Bombas simples | | Bombas dobles | | | Bombas simples con arrastre | |
|----------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Tam. const. | Cilindrada | Tam. const. | lado brida | lado tapa | Tam. const. | Cilindrada |
| 1 | 18,0 cm ³ = 018 | 21 | 40,1 cm ³ = 040 | 18,0 cm ³ = 018 | 2 | 40,1 cm ³ = 040 |
| | 27,4 cm ³ = 027 | | 45,4 cm ³ = 045 | 27,4 cm ³ = 027 | | 45,4 cm ³ = 045 |
| | 36,4 cm ³ = 036 | | 55,2 cm ³ = 055 | 36,4 cm ³ = 036 | | 55,2 cm ³ = 055 |
| | 39,5 cm ³ = 040 | | 60,0 cm ³ = 060 | 39,5 cm ³ = 040 | | 60,0 cm ³ = 060 |
| | 45,9 cm ³ = 046 | | 67,5 cm ³ = 068 | 45,9 cm ³ = 046 | | 67,5 cm ³ = 068 |
| 2 | 40,1 cm ³ = 040 | 41 | 69,0 cm ³ = 069 | 18,0 cm ³ = 018 | 4 | 69,0 cm ³ = 069 |
| | 45,4 cm ³ = 045 | | 81,6 cm ³ = 082 | 27,4 cm ³ = 027 | | 81,6 cm ³ = 082 |
| | 55,2 cm ³ = 055 | | 97,7 cm ³ = 098 | 36,4 cm ³ = 036 | | 97,7 cm ³ = 098 |
| | 60,0 cm ³ = 060 | | 112,7 cm ³ = 113 | 39,5 cm ³ = 040 | | 112,7 cm ³ = 113 |
| | 67,5 cm ³ = 068 | | 121,6 cm ³ = 122 | 45,9 cm ³ = 046 | | 121,6 cm ³ = 122 |
| 4 | 69,0 cm ³ = 069 | 42 | 69,0 cm ³ = 069 | 40,1 cm ³ = 040 | 5 | 138,6 cm ³ = 139 |
| | 81,6 cm ³ = 082 | | 81,6 cm ³ = 082 | 45,4 cm ³ = 045 | | 153,5 cm ³ = 154 |
| | 97,7 cm ³ = 098 | | 97,7 cm ³ = 098 | 55,2 cm ³ = 055 | | 162,2 cm ³ = 162 |
| | 112,7 cm ³ = 113 | | 112,7 cm ³ = 113 | 60,0 cm ³ = 060 | | 183,4 cm ³ = 183 |
| | 121,6 cm ³ = 122 | | 121,6 cm ³ = 122 | 67,5 cm ³ = 068 | | 193,4 cm ³ = 193 |
| 5 | 138,6 cm ³ = 139 | 51 | 138,6 cm ³ = 139 | 18,0 cm ³ = 018 | 5 | 138,6 cm ³ = 139 |
| | 153,5 cm ³ = 154 | | 153,5 cm ³ = 154 | 27,4 cm ³ = 027 | | 153,5 cm ³ = 154 |
| | 162,2 cm ³ = 162 | | 162,2 cm ³ = 162 | 36,4 cm ³ = 036 | | 162,2 cm ³ = 162 |
| | 183,4 cm ³ = 183 | | 183,4 cm ³ = 183 | 39,5 cm ³ = 040 | | 183,4 cm ³ = 183 |
| | 193,4 cm ³ = 193 | | 193,4 cm ³ = 193 | 45,9 cm ³ = 046 | | 193,4 cm ³ = 193 |
| 5 | 138,6 cm ³ = 139 | 52 | 138,6 cm ³ = 139 | 40,1 cm ³ = 040 | 5 | 138,6 cm ³ = 139 |
| | 153,5 cm ³ = 154 | | 153,5 cm ³ = 154 | 45,4 cm ³ = 045 | | 153,5 cm ³ = 154 |
| | 162,2 cm ³ = 162 | | 162,2 cm ³ = 162 | 55,2 cm ³ = 055 | | 162,2 cm ³ = 162 |
| | 183,4 cm ³ = 183 | | 183,4 cm ³ = 183 | 60,0 cm ³ = 060 | | 183,4 cm ³ = 183 |
| | 193,4 cm ³ = 193 | | 193,4 cm ³ = 193 | 67,5 cm ³ = 068 | | 193,4 cm ³ = 193 |
| 5 | 138,6 cm ³ = 139 | 54 | 138,6 cm ³ = 139 | 69,0 cm ³ = 069 | 5 | 138,6 cm ³ = 139 |
| | 153,5 cm ³ = 154 | | 153,5 cm ³ = 154 | 81,6 cm ³ = 082 | | 153,5 cm ³ = 154 |
| | 162,2 cm ³ = 162 | | 162,2 cm ³ = 162 | 97,7 cm ³ = 098 | | 162,2 cm ³ = 162 |
| | 183,4 cm ³ = 183 | | 183,4 cm ³ = 183 | 112,7 cm ³ = 113 | | 183,4 cm ³ = 183 |
| | 193,4 cm ³ = 193 | | 193,4 cm ³ = 193 | 121,6 cm ³ = 122 | | 193,4 cm ³ = 193 |

Datos técnicos (¡Para utilización con datos diferentes, por favor consúltenos!)

generales

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|----|------|------|----|------|----|------|----|----|------|----|----|----|
| Modo de fijación | fijación por brida según SAE J744 | | | | | | | | | | | | | |
| Conexiones de conductos | versión de brida SAE (rosca de fijación: UNC) | | | | | | | | | | | | | |
| Sentido de giro | horario o antihorario | | | | | | | | | | | | | |
| Sentido de flujo | entrada y salida son independientes del sentido | | | | | | | | | | | | | |
| Posición de montaje | opcional, preferente conexión de entrada arriba | | | | | | | | | | | | | |
| Accionamiento | accionamiento directo, coaxial; las fuerzas radiales y axiales no se pueden transmitir | | | | | | | | | | | | | |
| Masa | TC | 1 | 2 | 2K | 4 | 4K | 5 | 5K | 21 | 41 | 42 | 51 | 52 | 54 |
| | kg | 12 | 14,8 | 19,4 | 23 | 28,7 | 34 | 38,1 | 20 | 34 | 34,5 | 43 | 46 | 54 |

hidráulicos

| TC 1 y 2 (bombas) | | TC1 | | | | | TC2 | | | | |
|---|---|---|-----|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|
| Tamaño nominal ($\approx V$ en cm^3) | TN | 18 | 27 | 36 | 40 | 46 | 40 | 45 | 55 | 60 | 68 |
| Caudal máx. para $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, $\rho = 0,7 \text{ bar}$ y $v = 25 \text{ mm}^2/\text{s}$ | q_v l/min | 26 | 39 | 53 | 59 | 70 | 59 | 66 | 80 | 89 | 100 |
| Presión de servicio absoluta | | para empleo de fluidos acuosos y éster fosfórico mín. 0,9 bar | | | | | | | | | |
| Entrada | $p_{\text{min-máx}}$ bar | 0,83 hasta 2,4 (recom.: 1 ... 1,35) | | | | | | | | | |
| Salida continua para PVV | $p_{\text{máx}}$ bar | 210 | 210 | 210 | 160 | 140 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 |
| Salida continua para PVQ | $p_{\text{máx}}$ bar | 210 | 210 | 210 | 160 | 140 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| Pico | $p_{\text{máx}}$ | máx. 10% sobre pres. salida continua; no más de 0,5 s | | | | | | | | | |
| Vel. rotación | n_{min} min^{-1} | 600 | | | | | 600 | | | | |
| *) para 1 bar | $n_{\text{máx}}$ para PVV min^{-1} | 1800 | | | | | 1800 | | | | |
| Presión de entrada | $n_{\text{máx}}$ para PVQ min^{-1} | 2700 | | | | | 2700 | | 2500 | | |
| Pot. accionam. mín. necesaria para $\Delta p \approx 0 \text{ bar}$, $n \approx 1.450 \text{ min}^{-1}$ | kW | 1,1 | 1,5 | 2,2 | | | 3 | | | 4 | |
| Fluido hidráulico para empleo con los datos de serv. arriba indic. | | aceite mineral HLP según DIN 51524 Parte 2 | | | | | | | | | |
| sólo con juntas FKM (V^{ni}) | $p_{\text{máx adm.}}$ bar | 210 | 210 | 210 | 160 | 140 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 |
| éster fosfórico (HFD-R) | $n_{\text{máx adm.}}$ min^{-1} | 1200 | | | | | | | | | |
| Tamaño constructivo 4 y 5 (bombas) | | TC4 | | | | | TC5 | | | | |
| Tamaño nominal ($\approx V$ en cm^3) | TN | 69 | 82 | 98 | 113 | 122 | 139 | 154 | 162 | 183 | 193 |
| Caudal máx. para $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, $\rho = 0,7 \text{ bar}$ y $v = 25 \text{ mm}^2/\text{s}$ | q_v l/min | 101 | 120 | 141 | 167 | 177 | 203 | 223 | 234 | 267 | 285 |
| Presión de servicio absoluta | | para empleo de fluidos acuosos y éster fosfórico mín. 0,9 bar | | | | | | | | | |
| Entrada | $p_{\text{min-máx}}$ bar | 0,83 hasta 2,4 (recom.: 1 ... 1,35) | | | | | | | | | |
| Salida continua para PVV | $p_{\text{máx}}$ bar | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 |
| Salida continua para PVQ | $p_{\text{máx}}$ bar | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 |
| Pico | $p_{\text{máx}}$ | máx. 10% sobre pres. salida continua; no más de 0,5 s | | | | | | | | | |
| Vel. rotación | n_{min} min^{-1} | 600 | | | | | 600 | | | | |
| *) para 1 bar | $n_{\text{máx}}$ para PVV min^{-1} | 1800 | | | | | 1800 | | | | |
| Pres. entrada | $n_{\text{máx}}$ para PVV min^{-1} | 2500 | | 2400 | | | 2200 | | | | |
| Pot. accionam. mín. necesaria para $\Delta p \approx 0 \text{ bar}$, $n \approx 1.450 \text{ min}^{-1}$ | kW | 4 | | 5,5 | | | 7,5 | | | 11 | |