

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño de un robot paralelo a pequeña escala con 6 grados de libertad para la recreación de movimientos telúricos.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Electricidad especialización Electrónica y
Automatización Industrial**

Presentado por:

Nicolás Andrés Cruz Cordovez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Cruz Cordovez Nicolás Andrés* y doy mi consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Nicolás Cruz Cordovez

EVALUADORES

.....
Ing. Carolina Godoy MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Lisbeth Mena MSc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El Ecuador, debido a su ubicación geográfica es susceptible a movimientos telúricos, por lo que este trabajo propone presentar el análisis de una plataforma Stewart de 6 grados de libertad con la aplicación de simular este tipo de fenómeno natural, específicamente el terremoto del 16 de abril del 2016.

El proceso de construcción del prototipo se realizó en 5 etapas, en la primera se obtuvo los datos de desplazamiento del sismo en Ecuador. Luego se desarrolló la cinemática inversa del robot paralelo para el control de la posición y orientación del efector final. En la siguiente etapa se diseñó la estructura mecánica del robot paralelo con materiales de bajo costo para reducir la inversión final. Posteriormente, se realizó la programación del controlador en la tarjeta de desarrollo Arduino mega. Por último, se seleccionó los actuadores y sensores adecuados para la aplicación.

Los resultados se midieron mediante la comparación de las gráficas de los datos reales del sismo estudiado y los datos adquiridos por el simulador, en donde se observó que ambas ondas mantenían el mismo patrón de desplazamiento.

Finalmente, se demostró la efectividad de usar una plataforma Stewart para replicar sismos en tres ejes diferentes, gracias a los resultados obtenidos.

Palabras Clave: Simulador de sismos, Robot paralelo, Plataforma Stewart, Cinemática inversa.

ABSTRACT

Ecuador due to its geographical location is susceptible to telluric movements, so this work proposes to present the analysis of a Stewart platform of 6 degrees of freedom with the application of simulating this type of natural phenomenon, specifically the earthquake of April 16, 2016.

The process of construction of the prototype was carried out in 5 stages, in the first one the data of displacement of the earthquake in Ecuador was obtained. Then the inverse kinematics of the parallel robot was developed to control the position and orientation of the final effector. In the next stage, the mechanical structure of the parallel robot was designed with low-cost materials to reduce the final investment. Subsequently, the controller was programmed on the Arduino Mega development board. Finally, the appropriate actuators and sensors for the application were selected.

The results were measured by comparing the graphs of the real data of the studied seism and the data acquired by the simulator, where it was observed that both waves maintained the same displacement pattern.

In the end, it was demonstrated the effectiveness of using a Stewart platform to replicate earthquakes in three different axes, thanks to the results obtained.

Keywords: Stewart platform, parallel robot, earthquake simulator.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE PLANOS	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 1	1
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Marco Teórico.....	2
Capítulo 2	8
2. Metodología	8
2.1 Obtención de datos.....	8
2.2 Cinemática de la plataforma Stewart	10
2.3 Diseño mecánico	14
2.4 Programación y Control	16
2.5 Instrumentación y Actuadores	18
CAPÍTULO 3.....	20
3.Resultados y análisis	20

CAPÍTULO 4.....	27
4.conclusiones y recomendaciones	27
4.1 Conclusiones	27
4.2 Recomendaciones	29
BIBLIOGRAFÍA.....	31

ABREVIATURAS

CESMD Center for Engineering Strong Motion Data

USGS U.S Geological Survey

ANSS Advanced National Seismic System

CGS California Geological Survey

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetros
V	Voltios
Hz	Hertz
mA	Miliamperios
A	Amperios
Kg	Kilogramos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ondas Rayleigh [4]	3
Figura 1.2 Ondas Love [4]	3
Figura 1.3 Mesa vibratoria universidad del Valle [3]	5
Figura 1.4 Configuración del robot paralelo de la universidad Nacional, México [14] ..	6
Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso	8
Figura 2.2 Archivo SMC, datos de aceleración	9
Figura 2.3 Sistema biela-manivela.....	10
Figura 2.4 Coordenadas de las conexiones en el efector final	11
Figura 2.5 Coordenadas de conexiones en ejes de servomotores	11
Figura 2.6 Análisis vectorial de la plataforma Stewart	13
Figura 2.7 Brazo del robot paralelo.....	14
Figura 2.8 Articulaciones esféricas	15
Figura 2.9 Datos originales y Datos con frecuencia de muestreo menor.....	17
Figura 2.10 Datos con menor precisión y datos modificados.....	17
Figura 3.1 Gráfica del registro modificado	20
Figura 3.2 Gráfica del registro de baja precisión.....	21
Figura 3.3 Desplazamiento en X.....	21
Figura 3.4 Desplazamiento del efector final.....	22
Figura 3.5 Datos reales vs Datos medidos, eje X	22
Figura 3.6 Datos reales vs Datos medidos, eje Y	22
Figura 3.7 Datos reales vs Datos medidos, eje Z	23
Figura 3.8 Ejes de rotación a) Rotación en X, b) Rotación en Y, c) Rotación en Z....	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Dimensiones de la plataforma.....	15
Tabla 3.1 Espacio de trabajo del prototipo.....	24
Tabla 3.2 Costo del proyecto	25

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que en Ecuador “apenas el 10% de las edificaciones existentes en el país han sido diseñadas y construidas cumpliendo normas sismorresistentes; un 15% cumple parcialmente, y el 75% de edificaciones son altamente vulnerables ante los sismos” [1]. Por este motivo, se desarrollará una plataforma capaz de simular movimientos telúricos, con el fin de realizar pruebas del comportamiento de los materiales y sistemas constructivos ante un sismo.

1.1 Descripción del problema

Ecuador, un país susceptible a sismos debido a su ubicación geográfica demanda un mayor control en el cumplimiento de su código de construcción. “Sus costas próximas a una falla geológica, conocida como lengua de fuego, producto de la subducción de la placa de Nazca, con la placa de Sudamérica, han generado los sismos de mayor afectación al país.” [2]. Una muestra de esto fue lo que ocurrió el pasado 16 de abril de 2016, un terremoto de 7.8 en la escala de Richter, dejó 668 víctimas y pérdidas materiales valoradas en \$3.300 millones [3], lo que afectó a una gran cantidad de edificaciones cercanas al epicentro, ubicado en el cantón de Pedernales, provincia de Manabí. Por lo tanto, mientras no se consideren criterios sismo resistentes en los sistemas construcción de viviendas y edificios un evento de esta magnitud siempre afectará a la infraestructura de las ciudades

1.2 Justificación del problema

El presente proyecto tiene como finalidad demostrar que la plataforma Stewart puede replicar el movimiento de un sismo. Este equipo permitirá realizar pruebas sobre sistemas de construcción y materiales como hormigón, ladrillo, yeso, entre otros. Con el propósito de aumentar la seguridad de las edificaciones al reducir los daños estructurales ante sismos de mediana intensidad y a su vez reducir el número de damnificados en un sismo.

La plataforma Stewart, un tipo de robot paralelo, tiene como característica alta precisión y aceleración, condiciones necesarias para replicar el movimiento telúrico. Además, este manipulador es capaz de manejar cargas pesadas, por

ende, cuando se realice el simulador a escala no habrá problemas con los diferentes materiales o estructuras que se deseen probar.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar un simulador de sismos para la evaluación sistemas constructivos mediante una plataforma Stewart.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calcular la cinemática inversa del robot paralelo para el control automático de la plataforma mediante el análisis geométrico de la estructura mecánica
- Diseñar las articulaciones y eslabones para la elaboración de la estructura mecánica usando impresión 3D o materiales de bajo costo.
- Emplear una programación versátil para futuros proyectos mediante parámetros accesible a usuarios.

1.4 Marco Teórico

En la capital del Ecuador, se vive bajo constantes amenazas debido a fenómenos naturales, principalmente los sismos han despertado en los habitantes dudas sobre la resistencia estructural de sus edificaciones, lo que lleva a desarrollar medios que permitan analizar el comportamiento de las diferentes infraestructuras bajo los efectos de este fenómeno natural. Uno de estos medios, son los simuladores de sismos que replican las ondas sísmicas.

Los sismos generan 3 tipos de ondas, las ondas P, ondas S y las ondas superficiales. Las dos primeras son ondas que se propagan por el interior de la tierra, y para nuestro estudio no tiene mucha relevancia. Las últimas, son ondas que viajan y provocan el movimiento en la superficie de la tierra y tienen un periodo entre 20 segundos a 1 minuto [4]. Existen 2 tipos de ondas superficiales las Rayleigh y Love, cada una genera movimiento diferente de partículas. En las primeras “el movimiento que describen las partículas es una elipse contenida en el plano vertical a la dirección de propagación de la onda y girando en el sentido retrógrado del avance” [8], similar a las olas en el mar. Ver figura 1.1. En cambio,

en las ondas Love “el suelo se moverá de un lado a otro respecto de un plano horizontal y paralelo” [8]. Ver figura 2. Esta información ayuda a comprender el movimiento que deben realizar los equipos para replicar los terremotos.

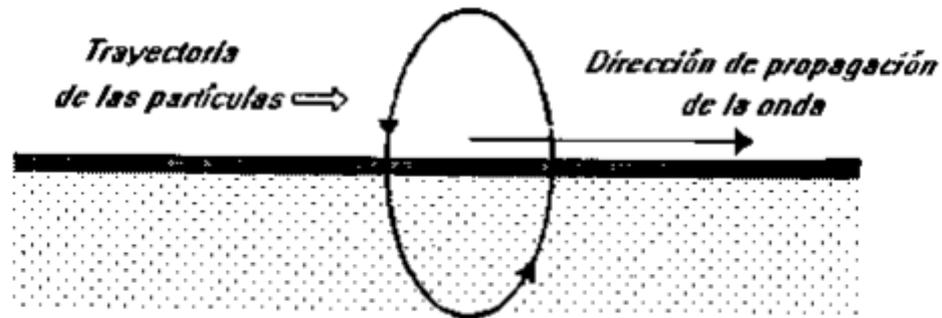


Figura 1.1 Ondas Rayleigh [4]

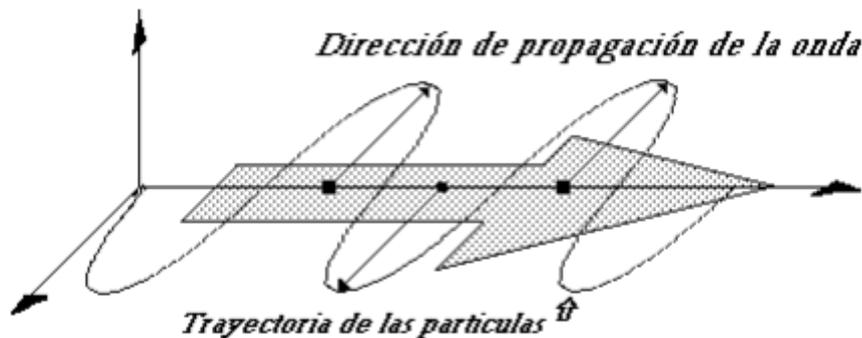


Figura 1.2 Ondas Love [4]

Existen 3 técnicas para el análisis del comportamiento sísmico de sistemas estructurales que son: los ensayos cuasi estáticos o cíclicos, ensayo en mesas vibrantes y ensayos pseudodinámicos. En el primero se somete a los materiales o estructuras a un registro determinado de desplazamiento o fuerzas, usualmente estos ensayos son a menor velocidad en comparación a un terremoto real. Esto permite obtener una mejor calidad en los datos adquiridos y que los actuadores utilizados sean de menor potencia. Esta prueba es utilizada para determinar la capacidad de los elementos y estructuras, o para calibrar modelos numéricos de sismos. Por otro lado, los ensayos en mesas vibrantes es la técnica más cercana al comportamiento de un sismo. Las estructuras son sometidas a velocidad y

deformaciones reales. Para lograr este comportamiento los actuadores deben ser robustos, ya que deben soportar la excitación dinámica de toda la masa. Una forma de solucionar ese inconveniente es trabajar con modelos a escala reducida, siempre y cuando la deformación unitaria del nuevo modelo se mantenga unitaria. Esto quiere decir que se debe escalar el desplazamiento al mismo tamaño del modelo. Por último, los ensayos psuedodinámicos son casos especiales de ensayos estáticos con la diferencia que la trayectoria de desplazamiento no es conocida antes de la prueba, sino que se van calculando mientras la prueba está en proceso. [6-10] algo que puede causar confusión es que existen simuladores conocidos como mesas vibrantes, similar a la técnica, en las cuales se pueden realizar los dos primeros ensayos hablados anteriormente.

En los últimos 10 años el simulador de sismos más conocido para el estudio del comportamiento de estructuras y subestructuras, bajo el efecto de entradas dinámicas, son las mesas vibratorias. Este equipo permite de una manera efectiva someter diferentes componentes de estructuras, subestructuras o estructuras reales a excitaciones dinámicas similares a las generadas por un terremoto [7]. Pueden ser diseñadas con un grado de libertad, conocido con el nombre de uniaxial, o hasta seis grados de libertad. La cantidad de grados de libertad permite replicar con mayor precisión los sismos o realizar otros tipos de análisis del comportamiento. Por ejemplo, introducir componente de giro al movimiento permite estudiar la interacción sobre la estructura [6]. Otro factor importante es el costo, aumentar un grado de libertad en estos equipos refleja un aumento elevado en el costo operativo [12] porque incluyen una variedad de componentes mecánicos, hidráulicos y eléctricos que aumentan por cada grado de libertad.

Otros estudios han optado por usar una mesa vibratoria uniaxial para disminuir el costo de elaboración, como es el caso del estudio de la Universidad del Valle en Cali, Colombia. Este trabajo desarrolló un simulador de sismos uniaxial teleoperado para estructuras a escala, que tiene un área de carga de 50*50*1.2 cm y un recorrido de 15cm (ver figura 1.3). Utiliza dos rodamientos lineales de baja fricción, un encoder lineal para medir posición y velocidad, un motor eléctrico con su respectivo controlador. La finalidad del estudio fue verificar que la mesa vibratoria sea capaz de replicar un sismo, mas no evaluar el comportamiento de

una estructura bajo los efectos del terremoto. Con este equipo se replicó el sismo de Armenia de 1999 para verificar su funcionalidad [13].

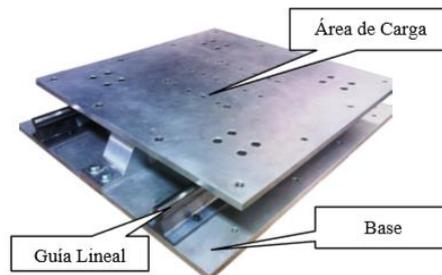


Figura 1.3 Mesa vibratoria universidad del Valle [3]

En cambio, en la universidad de Ambato, Ecuador. Se implementó una mesa vibratoria con la finalidad de analizar la dinámica de estructuras civiles a escala. La estructura de hormigón armado a escala 1:10 de 2 pisos y 115 Kg, fue sometida a pruebas con ondas de 0 a 15 Hz por 7 minutos. Por medio de 2 acelerómetros, uno en la planta baja y otro en la planta alta, se calculó la deformación en grados de la estructura. Finalmente, con el análisis de los datos verificaron si la estructura cumple el grado de seguridad permitido por las normas [9]. En este experimento no se usaron datos reales de un sismo para la excitación de la estructura.

También existen simuladores de gran envergadura que permite realizar pruebas sobre construcciones de tamaño real y de gran tamaño. El simulador más grande del mundo se encuentra en Japón, una mesa vibratoria de 1400 metros cuadrados, donde se experimentó con un edificio de 6 pisos, construido en su mayoría de madera, para estudiar el comportamiento de la estructura y su diseño, que usa como base este material. [11]

Por otra parte, la universidad Nacional Autónoma de México propone otro tipo de equipo para simular movimientos telúricos. Su objetivo fue estudiar la dinámica de un robot paralelo de 6 grados de libertad, y orientar su aplicación a simuladores de sismos. En la figura 1.4 se observa la estructura.

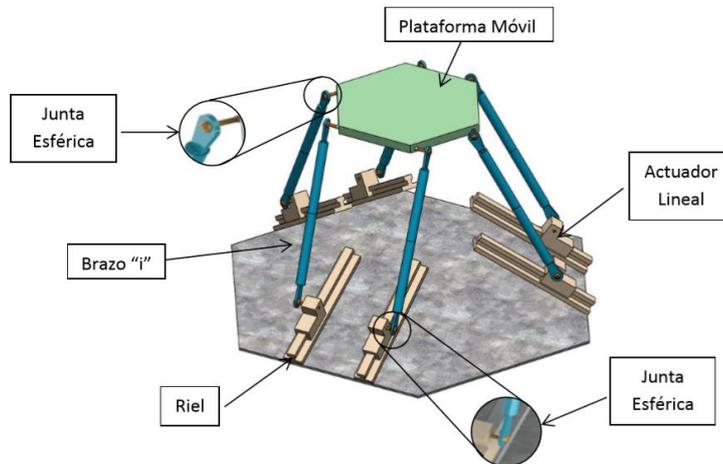


Figura 1.4 Configuración del robot paralelo de la universidad Nacional, México [14]

La estructura mostrada anteriormente, compuesta por 6 cadenas cinemáticas que unen la plataforma y la base del manipulador, en cada extremo de la cadena existe una junta o articulación esféricas permitiendo un movimiento libre y mediante actuadores lineales en cada una de las 6 cadenas se logra desplazar el efector final. Esa configuración del robot paralelo sirvió para el análisis de la cinemática y dinámica del robot el cual fue netamente matemático y simulado, demostrando que mediante el método de la transformada homogénea, se puede calcular la posición de cada eslabón para llevar al efector final a una posición y orientación deseada; y con el método de Euler-Lagrange se calculó las fuerza y la potencia que cada actuador debe aplicar para mover una carga de 85 Kg. Finalmente, con las variables encontradas se verificó que este tipo de robot paralelo pueda cumplir el objetivo de simular movimientos armónicos, similares a un sismo [14].

Según su estructura y modelo existen diferentes manipuladores paralelos en el mercado, que buscan cumplir con aplicaciones específicas, como el caso del Cassino Parallel Manipulator o CaPaMan, un robot paralelo de 3 grados de libertad, con el cual se estudió el comportamiento 3D del terreno cuando es sometido a un terremoto, ya que el terreno afecta fuertemente a la dinámica de excitación de las edificaciones. En los experimentos se usó una estructura básica, donde se ubicaron los sensores de aceleración para analizar el comportamiento del simulador de sismos. [5]

Una de las principales ventajas de usar un robot paralelo es su alta resistencia, característica que va de la mano con el posicionamiento preciso de su efector final y la alta capacidad de carga útil que puede manipular [15]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se define el diseño y los componentes utilizados para llevar a cabo el proyecto. Se lo dividió en 5 etapas fundamentales que son: la obtención de datos, la cinemática del robot paralelo, el diseño mecánico, la programación y control, y la instrumentación y actuadores de la plataforma. En la figura 2.1 se muestra un diagrama del proceso

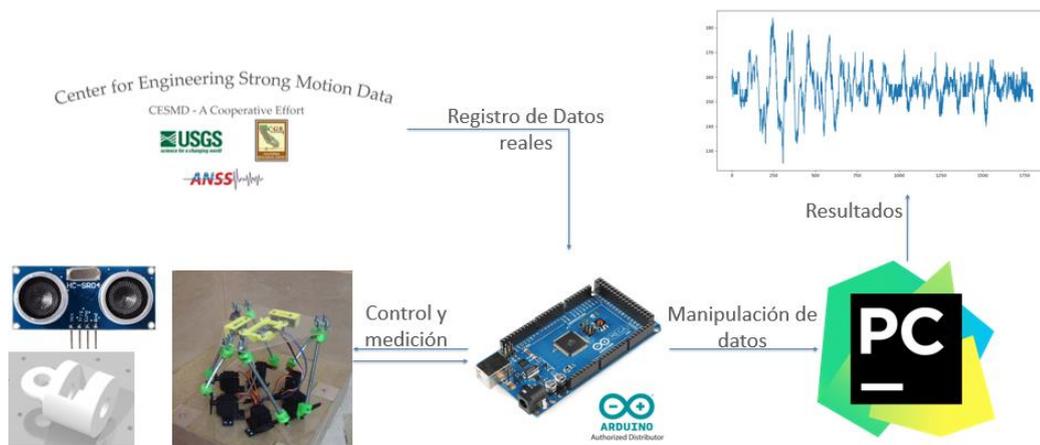


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso

El proceso comienza seleccionando el registro de datos del terremoto que se desea replicar, luego por Arduino IDE se debe ingresar los datos, considerando la limitación de la memoria de la tarjeta, luego se carga el programa al Arduino. Inmediatamente la plataforma comienza a funcionar, pero no se ha comunicado con pycharm, el software que permite procesar la información adquirida por el Arduino. El siguiente paso es cargar el script de pycharm y corremos el archivo. La plataforma reinicia su proceso, pero esta vez la tarjeta y el software ya se comunican por el puerto serial. Por último, cuando termine de ejecutarse el proceso, se presenta la gráfica y los datos generados por el sismo simulado. Para entender mejor los resultados, usando la misma aplicación se escala los valores obtenidos y así sobreponer los resultados con los gráficos del terremoto.

2.1 Obtención de datos

Los datos del sismo de Ecuador del 2016 se obtuvieron en CESMID, una base de datos web donde registran movimientos telúricos de todo el mundo. Existen 3 instituciones que cooperan para llevar este registro, la ANSS, USGS, y CGS, con

el fin de realizar diferentes estudios. Para el terremoto en Ecuador solo se encontraron disponibles los datos de una estación en Otavalo, en las demás estaciones los datos se encuentran restringidos, solo se muestra las gráficas de aceleración, pero no permite descargar.

La información descargada era completa, los archivos relevantes para la aplicación tenían extensión SMC, ver figura 2.2. Por cada variable medida, como aceleración, desplazamiento y velocidad, existen 3 archivos, cada uno representaba una orientación diferente con la cual fue adquirida los datos. En estos se encontraba toda la información importante del sismo. Sin embargo, la información estaba codificada con una serie de números enteros y decimales restringiendo el uso. Por lo que fue necesario leer el manual que explica el contenido de los archivos SMC y menciona que es cada número registrado en los archivos mencionados anteriormente.

```

CORRECTED ACCELEROGRAM
*
OTAV
2016 04 16 2358 SSE OF MUISNE, ECUADOR
Moment Mag= 7.8 Ms= M1=
station = Otavalo, Ecuador component= 360
epicentral dist = 165.8 pk mot = 7.1
inst type=Titan data source = USGS/IRIS/GSN
*
*
-32768 2016 107 23 58 1 8 -32768
1 -32768 -32768 -32768 90 360 -32768 9
36000 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768
-32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 1 36000
-32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768
-32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768
0.170000E+39 0.100000E+03 0.371000E+00 -0.799400E+02 0.192000E+02
0.780000E+01 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.554300E+28
0.237600E+00 -0.784500E+02 0.349500E+04 0.170000E+39 0.170000E+39
0.170000E+39 0.165778E+03 0.275088E+03 0.170000E+39 0.170000E+39
0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39
0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.100040E+03 0.705543E+01
0.882100E+02 -0.604699E+01 0.400000E-01 -0.200000E+01 0.450000E+02
0.500000E+02 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39
0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39
0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39 0.170000E+39
| Converted to SMC format using program sac2smc on 2016/05/09 13:59
| Input file: IU.OTAV.20.HN1.M.2016.107.235801.SAC
| <SCNL>OTAV.HN1.IU.20
|
| Digital counts re-scaled using the factor 4.6776400E-04 cm/s/s/count
| EventID: us20005j32
| Source Magnitude: US
| Source Location: US
| Source Seismic Moment: US
| 1.3078E-4 1.1550E-4 8.7014E-4 1.1566E-4 1.3014E-4 8.8498E-4 1.3032E-4 1.1503E-4

```

Figura 2.2 Archivo SMC, datos de aceleración

Luego de comprender el manual se encontró que cada registro, sin importar la orientación o la variable medida, tiene una cantidad de 36000 datos a una frecuencia de 100Hz, lo que significa que toda la trama medida dura 6 minutos. También nos indicó la fecha, magnitud y profundidad del terremoto; la distancia del epicentro a la estación, orientación del sensor, el tipo de sensor medido, etc.

Otro dato importante fue la orientación de los datos medidos, ya que para el simulador eso representó el eje en el cual se replicó el sismo. El norte representa el eje Y, el este el eje X y apuntando hacia arriba del plano entre el norte y el este, tenemos el eje Z.

Como el efector final se traslada de un punto a otro mediante coordenadas espaciales en X, Y, Z. Se decidió usar los registros de desplazamiento del terremoto para simular el sismo seleccionado.

2.2 Cinemática de la plataforma Stewart

La plataforma Stewart es un tipo de configuración de un robot paralelo caracterizado por su robustez, para esta aplicación el robot tiene una base y un efector final construido en acrílico, conectados por medio de un mecanismo biela-manivela que simulan el comportamiento de la articulación prismática, ver figura 2.2. En la conexión de la plataforma y la unión entre la biela-manivela existe una articulación esférica pasiva, con el fin de tener movimiento sin restricciones en cada eslabón del robot paralelo. Gracias a la articulación el efector final puede desplazarse y rotar en los 3 ejes sin causar un daño mecánico a la estructura.

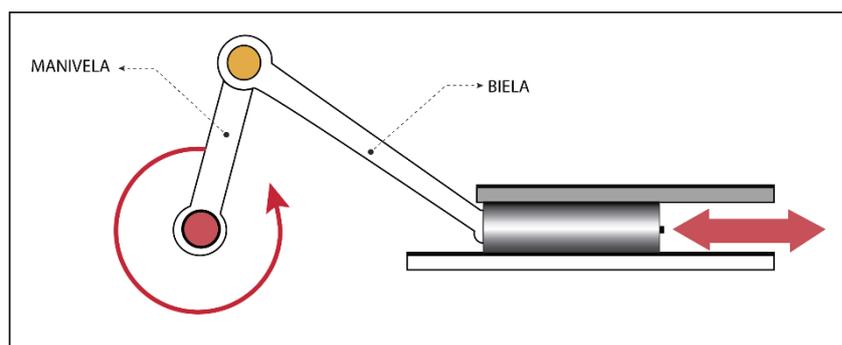


Figura 2.3 Sistema biela-manivela

En el presente proyecto se aplicó la cinemática inversa de la plataforma por medio del análisis geométrico de la estructura para obtener la posición y orientación deseada del efector final. Este proceso consiste en referenciar la conexión de los

brazos del manipulador a un sistema de coordenadas en común, en este caso, la base del prototipo es el punto de origen, es decir, la coordenada (0,0,0).

Lo primero es ubicar las conexiones en el efector final y la base en el espacio, usando coordenadas cartesianas, cada uno con su propio sistema de referencia. Ver figura 2.3 y 2.4.

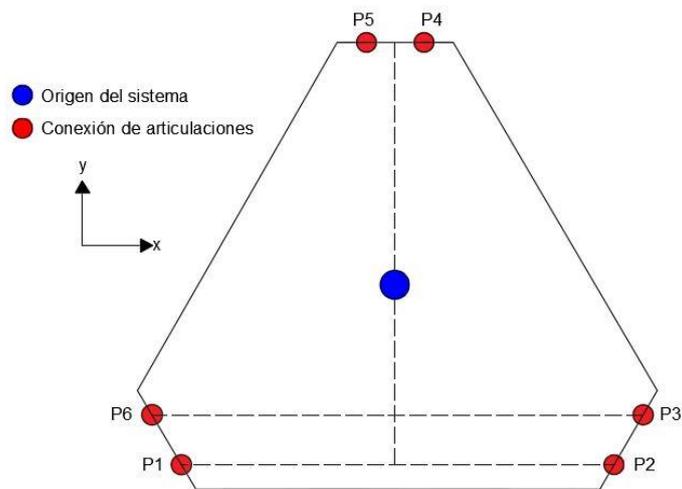


Figura 2.4 Coordenadas de las conexiones en el efector final

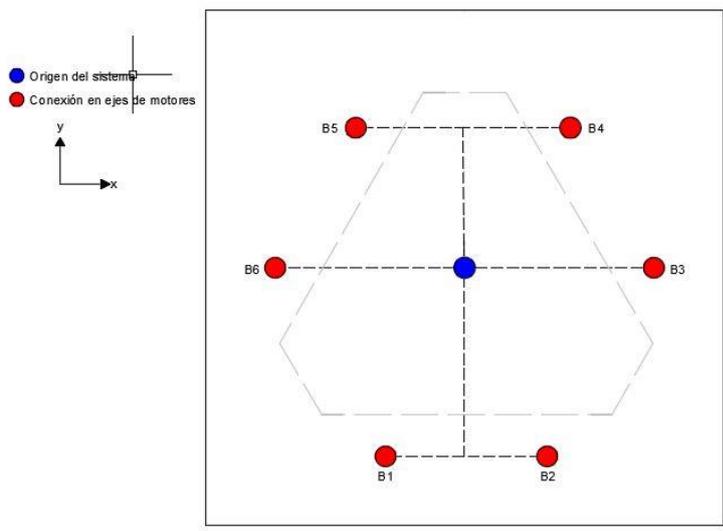


Figura 2.5 Coordenadas de conexiones en ejes de servomotores

Los puntos P1 hasta P6 representan las coordenadas en (X, Y, Z) de las conexiones de las articulaciones esféricas en el efector final del robot, con su propio sistema de referencia. En cambio, los puntos B1 hasta B6 representan las

coordenadas en (X, Y) de las conexiones del eje de los motores con las articulaciones esféricas en el otro extremo de su respectivo brazo, referenciados al sistema común del manipulador. Además, es necesario dar una orientación a los servomotores para conocer las coordenadas del extremo de la manivela.

$$\Omega = \left[0, \frac{\pi}{2}, \frac{2\pi}{3}, -\frac{\pi}{3}, -\frac{2\pi}{3}, \frac{\pi}{3}\right] \quad (2.1)$$

Donde Ω presenta el ángulo con respecto al eje X, del plano creado por el eje de rotación de los motores

Como las coordenadas del efector final se encuentran en un sistema de referencia diferente, se usó la matriz de rotación, que define la orientación de un sistema respecto a otro, con el fin de referenciar los puntos P al mismo sistema de la base.

$$R_b^p = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \quad (2.2)$$

Para la posición del efector final con respecto a la base se define el vector de translación T.

$$T = (tx, ty, tz)^t \quad (2.3)$$

Estas variables son las que cambiarán cada vez que la posición y orientación del robot sea alterada, es decir, si desplazamos el robot en el eje X, la variable t_x debe aumentar.

En la figura 2.5 se muestra el análisis geométrico de la plataforma y se deducen las ecuaciones 2.3 y 2.4. El mecanismo de biela-manivela representa el vector l_i lo que viene a ser nuestra variable principal, ya que modificando este vector en cada uno de los 6 servomotores se consigue la orientación y posición deseada. Si el diseño manejará pistones neumáticos simplemente modificando la longitud del vástago l_i cambiaría, pero como se usó servomotores la rotación en el eje mueve el mecanismo de biela-manivela y de esa forma conseguimos modificar el largo del vector l_i .

$$q_i = T + R_b^p * p_i \quad (2.4)$$

$$l_i = T + R_b^p * p_i - b_i \quad (2.5)$$

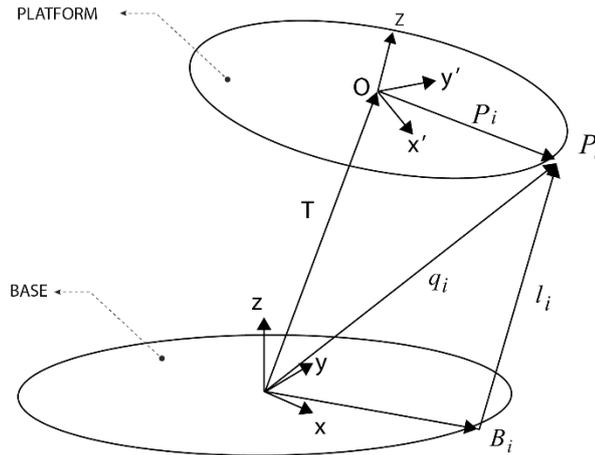


Figura 2.6 Análisis vectorial de la plataforma Stewart

El vector b_i indica la posición de la conexión entre la biela y manivela, dicho punto cambia cuando el servomotor gira para cambiar de posición y orientación del efector final. Por ende, ese punto debe quedar en función del ángulo del servo motor o manivela.

$$b_{i_x} = lb1 * \cos(\theta) * \cos(\Omega) - B_i \quad (2.6)$$

$$b_{i_y} = lb1 * \cos(\theta) * \sen(\Omega) - B_i \quad (2.7)$$

$$b_{i_z} = lb1 * \sen(\theta) \quad (2.8)$$

La constante $lb1$ es el tamaño del brazo del servo motor o manivela, θ es la posición angular del eje del servomotor, donde la horizontal es 0 grados. Luego de obtener las coordenadas, se obtiene la distancia entre b_i y el punto de conexión de la articulación esférica con el efector final, que anteriormente lo nombramos P, esa distancia siempre debe ser igual a la longitud de la biela.

2.3 Diseño mecánico

El principal desafío en esta etapa del proyecto, fue el funcionamiento de la articulación prismática y la articulación esférica pasiva. La primera es simulada por el mecanismo de biela-manivela, ver figura 2.6. Este sistema mecánico funciona de tal manera que al rotar el eje del motor la longitud del brazo entre la base y plataforma se modifique. La manivela es representada por el brazo del servomotor y la biela por un tornillo sin fin que en sus extremos tiene conectado las articulaciones esféricas.

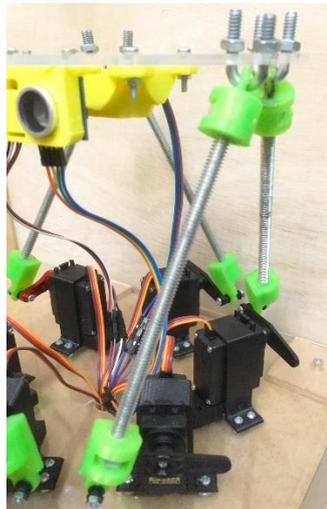


Figura 2.7 Brazo del robot paralelo

Por otro lado, la articulación esférica permite mover libremente el efector final, por sus tres grados de libertad pasivos. Una rótula mecánica es capaz de realizar este tipo de movimiento, pero por su alto costo se buscó otra alternativa. Por lo cual, se diseñó una pieza en 3D que permitió replicar el funcionamiento de una rótula mecánica, ver figura 2.7.

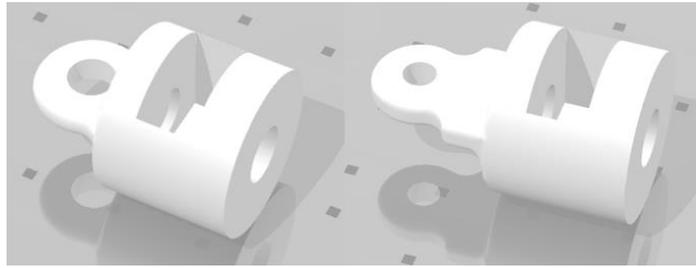


Figura 2.8 Articulaciones esféricas

Otras partes mecánicas también fueron diseñadas en 3D, como el soporte de los sensores, diseño en internet, y los sujetadores de los servomotores, diseñados por el tutor. En cambio, tanto la base como el efector final se implementaron en acrílico. En la siguiente tabla 2.1 se muestra las dimensiones de las piezas más relevantes.

Tabla 2.1 Dimensiones de la plataforma

Pieza	Característica	Dimensiones
Base	Cuadrada	Lado de 25 cm
Plataforma	Triangulo truncado en sus puntas	Lado mayor 14 cm Lado menor 4 cm
Biela	Brazo del servomotor	Longitud 2 cm
Manivela	Tornillo sin fin acoplado a articulaciones esféricas	Longitud 17 cm

Por otra parte, para armar la plataforma Stewart cada servomotor debía ubicarse en las coordenadas especificadas en la cinemática inversa de igual manera la conexión de las articulaciones esféricas en el efector final. Una vez terminado el armado, se verificó que las coordenadas y longitudes deseadas sean las correctas. Como este proceso se realizó manualmente existieron cambios con respecto a los valores previamente definidos, provocando modificaciones en la programación.

Finalmente, se elaboró una base de madera para la plataforma Stewart, con la intención de almacenar el Arduino mega y sobre esta se colocaron dos planos verticales de madera para el funcionamiento de los sensores ultrasónicos.

2.4 Programación y Control

Es esta fase del proyecto se llevó la parte matemática de la cinemática inversa a lenguaje de programación C++, el cual es una de las opciones en Arduino IDE, software que se encarga de compilar y cargar la programación a la tarjeta de desarrollo Arduino mega. También mediante este código se realizó el control de posición de los servomotores y obtención de datos de cada sensor.

Una de las ventajas de la programación realizada es su versatilidad, porque se puede ingresar cualquier otro registro de desplazamiento de un terremoto. Simplemente se debe prevenir que el tamaño de los datos del nuevo terremoto sea mayor a la capacidad del Arduino mega. Asimismo, si se diseña una nueva estructura mecánica de mayor o menor dimensión, solo es necesario cambiar los parámetros físicos que afectan a la cinemática inversa del robot, como las coordenadas de los puntos P y B, orientación del eje de los servomotores Ω , y longitud de la biela y manivela. La única limitación del código es el accionamiento de los actuadores, ya que estos se mueven por control de posición, es decir, dada una señal el eje se mueve una cantidad de grados, mientras otros actuadores no tienen esta facilidad, como los motores DC.

Un problema que se presentó con el Arduino mega fue la limitación de memoria de la tarjeta. El registro de datos adquiridos en CESMD, tenía 36000 valores de desplazamiento en un eje específico con una precisión de 1×10^{-8} , y la memoria de la tarjeta es 155 kbytes aproximadamente. Por la precisión, los datos debían ser almacenados como una variable float, eso quiere decir que cada valor del registro ocupa 4 bytes. Por ende, los 36000 datos ocuparían 144 kbytes aproximadamente, lo que ocuparía el 92% de la memoria. A esto hay que sumarle la memoria consumida por el resto de la programación que es del 45%. Por lo tanto, fue necesario reducir la cantidad de datos.

Para reducirlos, se cambió la frecuencia de muestreo de la onda, de 100 datos por segundo del registro original, se usó 6.25 Hz en la frecuencia de muestreo de la nueva onda, lo que redujo la cantidad de datos a 2250. La forma de onda no se vio afectada, ver figura 2.8. Además de reducir el tamaño del registro de datos fue

necesario cambiar la precisión de los valores, porque la plataforma Stewart tiene una precisión de 0.5.

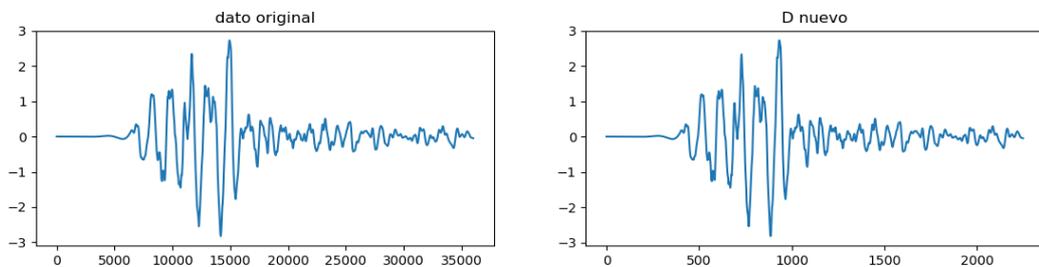


Figura 2.9 Datos originales y Datos con frecuencia de muestreo menor

Con la finalidad de aprovechar más la memoria de la tarjeta se quitó el punto decimal de los datos cambiando la escala a valores enteros, y así poder almacenar el registro de datos como una variable INT que consume 2 bytes, finalmente la gráfica que describe el registro de datos modificado y que fue ingresado al simulador se muestra en la figura 2.9

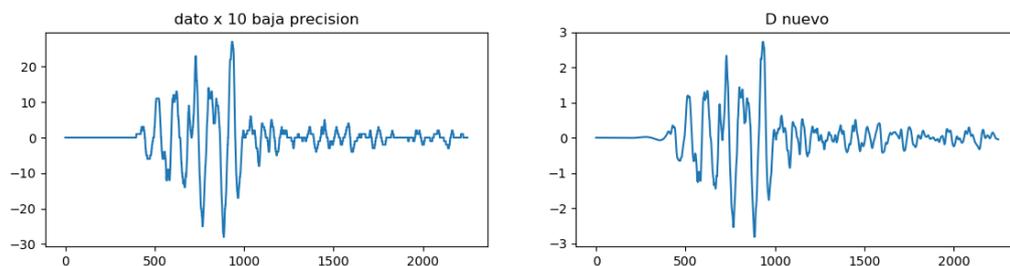


Figura 2.10 Datos con menor precisión y datos modificados

El siguiente paso fue la adquisición de los valores proveniente de los sensores. Con Arduino IDE no es posible almacenar información para luego extraerla, al menos que se use un módulo de tarjeta SD, pero este proceso consume memoria. Mediante Python, que es capaz de comunicarse con el puerto serial del Arduino IDE, se realizó la adquisición de datos para luego procesar la información en el entorno Pycharm. En este entorno de desarrollo se escaló los datos adquiridos para poder compararlos con los valores del registro de dato modificado y también se lo comparó con la gráfica de 2250 datos y alta precisión.

2.5 Instrumentación y Actuadores

En primera instancia, se definieron los actuadores encargados de mover la plataforma. En el proyecto se usaron 3 servos motores modelo HIGH-TORQUE MG996R y 3 modelo MG995R. El principal problema con estos equipos fue la diferencia que existió en su funcionalidad entre modelos iguales, por adquirirlos en tiendas diferentes los parámetros de estos actuadores variaba, por eso se terminó usando dos modelos desiguales, que funcionaban de una misma manera. Los servomotores operan con 5 Vdc, una señal de control de 50 Hz, corriente pico de 2.5 A y corriente de consumo entre 500 – 900 mA. Esta corriente de consumo no puede ser suministrada por el Arduino mega por lo que fue obligatorio adquirir una fuente conmutada de 5V-5A para energizar 5 motores y para el sexto se usó un cargador de celular. Si la fuente de alimentación no es lo suficientemente potente los servomotores se mueven aleatoriamente, lo que puede provocar daños en la estructura mecánica. Por otra parte, los actuadores son fáciles de controlar, ya que por medio del Arduino mega se controla el ancho de pulso del PWM, y así se indica los grados que se desea girar el eje del motor. Además, estos motores tienen una protección mecánica que les permite girar solo 180 grados, lo que ayuda a proteger el diseño mecánico de la plataforma, impidiendo que un brazo del manipulador realice un movimiento fuera del rango permitido.

Inicialmente se buscó la alternativa de trabajar con motores DC de bajo costo con encoder, pero la señal proveniente de éste se encontraba desfasada 180 grados. Por ende, la retroalimentación no permitió identificar el sentido de giro del motor.

En la instrumentación hubo un problema parecido al de los actuadores. Al principio se usó un acelerómetro modelo ADLX345, que viene integrado en el sensor GY-85, capaz de medir la aceleración en 3 ejes. Además, este sensor tiene incorporado un giroscopio y un compás digital. Las complicaciones surgieron luego de hacer unas pruebas con el acelerómetro y encontrar que la vibración de la plataforma generaba mucho ruido en la medición, por lo cual se buscó otro sensor para la aplicación. Finalmente, usando 3 sensores ultrasónicos modelo HC-SR04 con resolución de 0.3 cm, rango de medición de 2 cm a 400 cm, y voltaje de operación de 5 V. Con un sensor en cada eje, se logró medir el

desplazamiento de la plataforma Stewart, información necesaria para comprobar si el equipo se comportaba como un sismo con los datos ingresados. Por otra parte, para lograr la medición óptima de estos sensores se levantaron dos paredes en el soporte del simulador, justo en la dirección donde apuntan los sensores del eje X, Y porque estos emiten una señal ultrasónica que debe rebotar en algún material cercano y así poder medir la distancia que existe entre el sensor y la pared.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con el fin de verificar el comportamiento del prototipo se comparó, por medio de gráficas los datos obtenidos en CESMD y los datos adquiridos por los sensores ultrasónicos. Se debe recalcar que cada prueba se efectuó desplazando un solo eje.

Por falta de memoria en la tarjeta de desarrollo los datos del sismo se modificaron. Primero se cambió la frecuencia de muestreo para disminuir el tamaño del registro de datos, ver figura 3.1. para evitar confusión se lo denominara registro modificado.

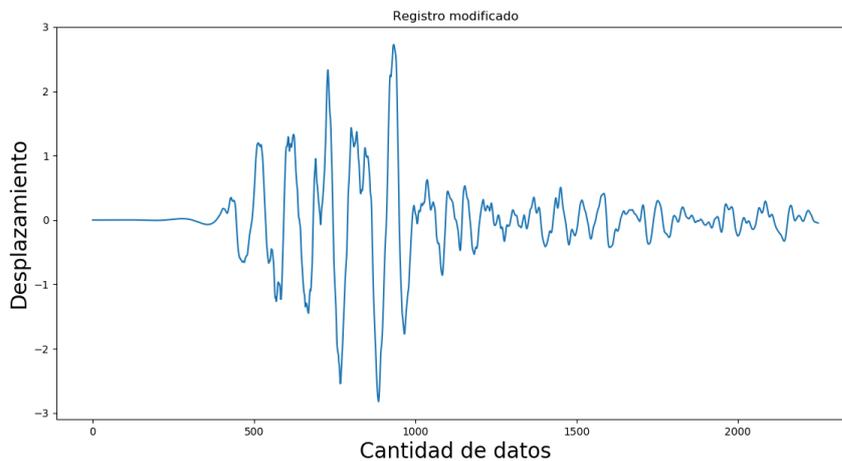


Figura 3.1 Gráfica del registro modificado

La baja precisión de la plataforma Stewart hizo modificar aún más los datos del sismo, lo que llevó a crear un nuevo registro donde se bajó la precisión de los datos, ver figura 3.2. para evitar confusión se lo denominara registro de baja precisión.

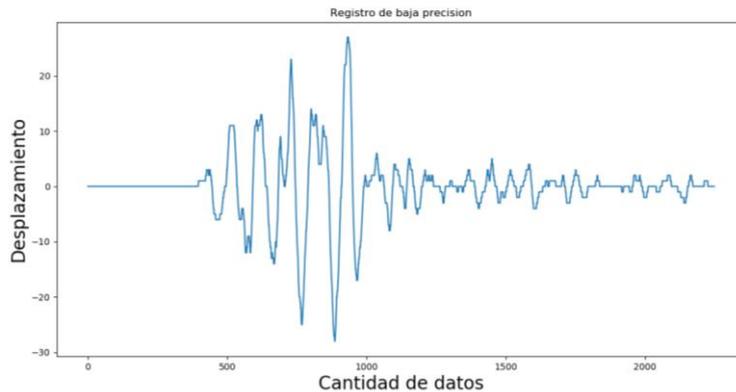


Figura 3.2 Gráfica del registro de baja precisión

Una vez ingresados los valores modificados del sismo a replicar, es decir, el registro de baja precisión. Pycharm se adquirió los valores medidos por los sensores ultrasónicos para luego graficar el registro de datos generado por el simulador, ver figura 3.3.

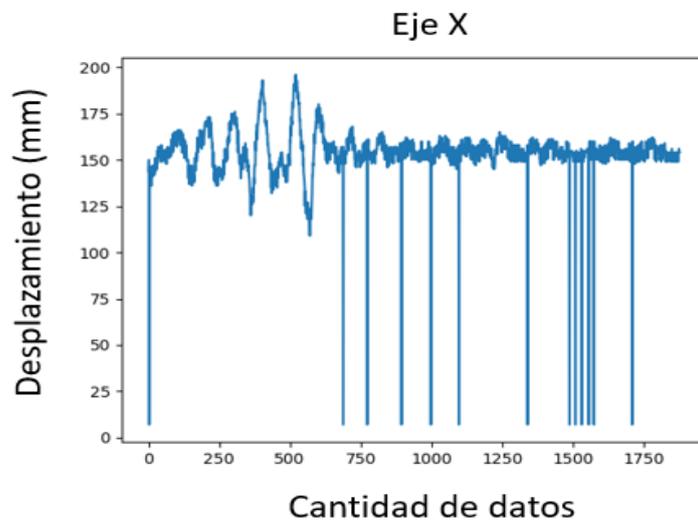


Figura 3.3 Desplazamiento en X

Como los sensores están sujetos al efector final, se producen valores erróneos por movimientos bruscos del simulador. En la figura 3.3 los valores erróneos se reflejan como picos de la señal adquirida. También existe ruido en la señal por la vibración constante del elemento terminal. Mediante programación en Pycharm se eliminó solamente los picos en la señal, ya que el ruido no afecta para el análisis de los resultados. Ver figura 3.4

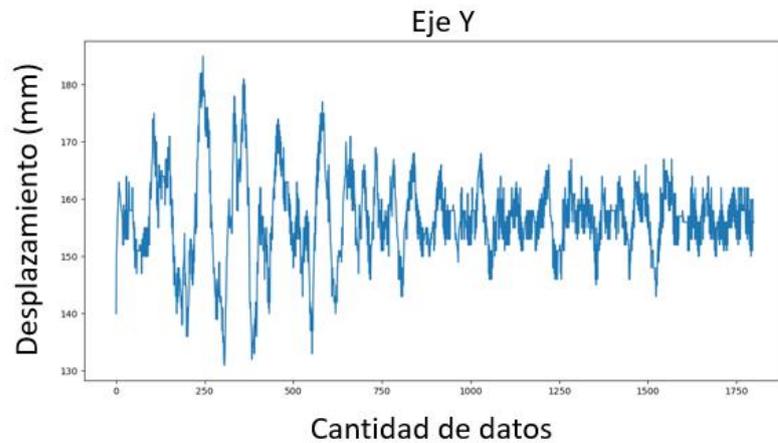


Figura 3.4 Desplazamiento del efector final

Luego de obtener las ondas en cada eje se comparó el registro de baja precisión con los datos adquiridos en el proceso, con el fin de montar en una sola figura ambas gráficas y así medir los resultados. En las figuras 3.5, 3.6 y 3.8 se observan el resultado final en los ejes X, Y, Z respectivamente.

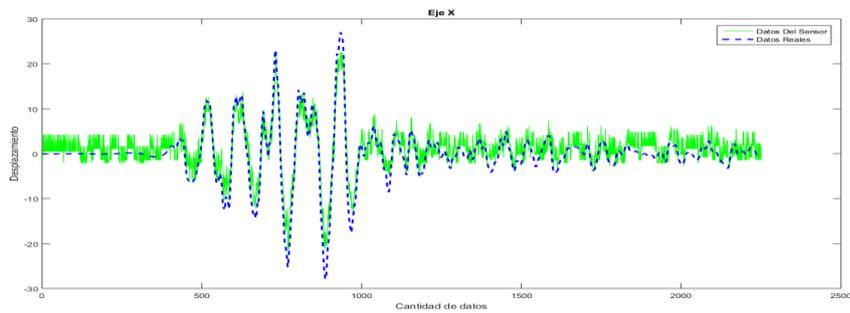


Figura 3.5 Datos reales vs Datos medidos, eje X

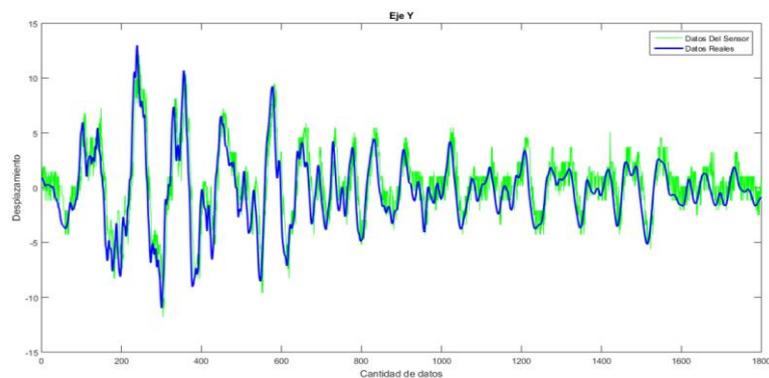


Figura 3.6 Datos reales vs Datos medidos, eje Y

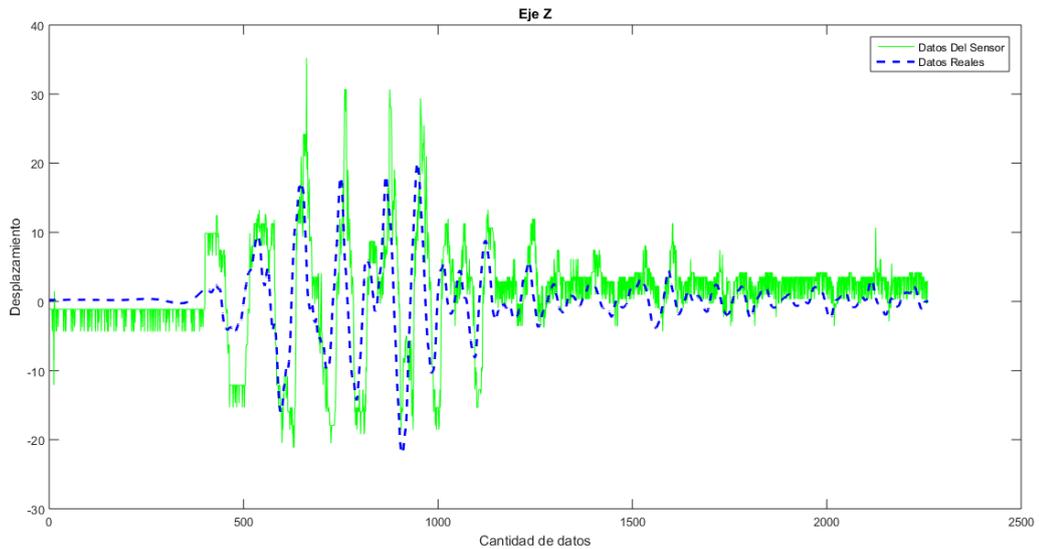


Figura 3.7 Datos reales vs Datos medidos, eje Z

Se observa en las figuras anteriores que el patrón o desplazamiento originado por el sismo, fue replicado por la trayectoria del efector final de la plataforma Stewart, demostrando que el prototipo es capaz de replicar el comportamiento de un sismo. Sin embargo, no todos los ejes describieron una trayectoria precisa, el mejor resultado se lo obtuvo en eje Y, donde prácticamente una onda está montada sobre la otra. Así mismo, en el eje X las ondas trazan un recorrido muy similar, aunque en el tramo final estas se debían. Por otro lado, en el eje Z las ondas varían y no siguen el mismo patrón. Esto no necesariamente indica que el prototipo no funciona correctamente en dicho eje.

Uno de los objetivos de este proyecto, se dirigió a la construcción de una plataforma Stewart con 6 grados de libertad, donde fue suficiente utilizar tan solo 3 de ellos para la simulación del movimiento telúrico, esto se debe a que según los datos descritos por el CESMD el desplazamiento solo se efectúa en los ejes X, Y, Z. Los 3 grados de libertad restantes son rotación en X o Roll, rotación en Y o Pitch y rotación en Z o Yaw. Estos no fueron necesarios de utilizar en la aplicación, pero para someter una estructura a replicas más reales son precisos y el modelo utilizado es capaz de realizarlos si otra práctica lo amerita. Esto permite que el prototipo diseñado pueda ser considerado para diversos proyectos donde se

necesite hasta 6 grados de libertad, una potencial ventaja para futuras aplicaciones del robot paralelo. En la figura 3.8 se observa la rotación en los ejes mencionados

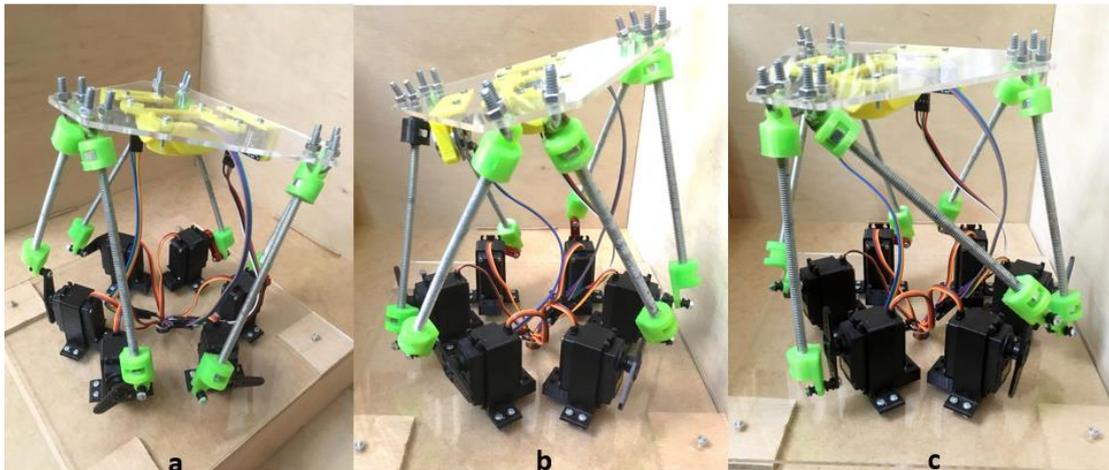


Figura 3.8 Ejes de rotación a) Rotación en X, b) Rotación en Y, c) Rotación en Z

Otra característica importante de un robot industrial es su espacio de trabajo, en los robots paralelos el espacio de trabajo es reducido. Se realizaron pruebas del máximo alcance de movimiento del prototipo en cada eje por separado, lo mismo sobre cada eje de rotación. Los resultados se observan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Espacio de trabajo del prototipo

Desplazamiento (mm)	MAX	MIN
X	45	-45
Y	35	-35
Z	20	-15
Rotación (grados)	-	-
Roll	16	-10
Pitch	12	-12
Yaw	22	-22

Los rangos mostrados en la tabla fueron considerados sin fallas mecánicas o fallas por mal funcionamiento. Por ejemplo, en el eje Z, como se observa en la tabla no

es simétrico su desplazamiento, si la plataforma se desplaza a la posición -16 en Z se genera fricción entre la articulación esférica y el brazo del servo motor, provocando vibración en el actuador, debido al esfuerzo que realiza para continuar con la trayectoria deseada. Ese problema se lo considera una falla mecánica. Mientras una falla por mal funcionamiento ocurre en los ejes que al excederse de su rango el efector final realiza un desplazamiento erróneo. Por ejemplo, si el efector final excede los límites de desplazamiento en el eje X, la posición de este empieza a variar con respecto a la posición deseada, en este caso, la plataforma se movería en el eje Z. Por lo tanto, la plataforma tendría una orientación o posición no indicado por el usuario.

Además de existir limitaciones mecánicas o por mal funcionamiento, están los puntos singulares del manipulador. Son posiciones del robot donde se pierde grados de libertad, en este caso, el espacio de trabajo de la plataforma mostrados anteriormente fue calculado desplazando individualmente cada eje, es decir, esos puntos son singulares. Por lo tanto, no es posible llegar a los valores máximos si la plataforma se desplaza en dos ejes a la vez, como la aplicación no lo demanda no se encontró el espacio útil del robot.

La construcción de este primer prototipo se realizó considerando equipos y materiales de bajo costo, buscando reemplazar piezas mecánicas por impresiones 3D, En la tabla 3.2 se encuentra la descripción de los precios de cada material y equipo utilizado

Tabla 3.2 Costo del proyecto

Equipo o material	Descripción	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor final (\$)
Acrílico	Corte + material	1	6.75	6.75
Impresión 3D	Soporte de sensor	3	5	15
Impresión 3D	Acople de articulación esférica	12	1.667	20

Impresión 3D	Soporte de servomotor	6	1.667	10
Impresión 3D	Sujetador de servomotor	6	2.5	15
Servomotor	MG996R	6	12	72
Sensor ultrasónico	HC-SR04	3	3.5	10.5
Tarjeta de desarrollo	Arduino mega	1	60	60
Jumper	40 cables por unidad	1	2.6	2.6
Fuente conmutada de 5V	Color plateado, entrada de 110 [V]	1	13	13
Varios	Tornillos, tuercas, clavos, etc.	1	10	10
Total				234.85

El análisis del costo de implementación del simulador a escala real dependerá de los requisitos del cliente, ya que primero es necesario conocer todas las características que se deben cumplir, como el espacio de trabajo, carga máxima y dimensiones. Por otra parte, el diseño mecánico se vuelve más complejo al aumentar el tamaño del equipo, lo que demanda mayor estudio del sistema mecánico. El diseño eléctrico también puede representar un nuevo problema para implementar el simulador, sobre todo en la parte de potencia. Usar actuadores de mayor potencia demanda controladores más robustos que exigen un sistema de protección más eficaz y costoso. Si bien el comportamiento de la plataforma sigue siendo igual, el nuevo diseño debe ser analizado.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El prototipo permitió validar que una plataforma Stewart cumple con características esenciales para simular sismos. Sin embargo, el objetivo principal que es probar sistemas estructurales en las condiciones dinámicas de un sismo, no es factible usando el modelo. Para eso, es necesario llevar el diseño a mayor escala y así realizar el estudio correspondiente de las estructuras.

Se construyó un robot paralelo de 6 grados de libertad, que cumple con las 3 características principales de los robots industriales que son: ser reprogramable y multifuncional con 3 ejes o más. Con el cual se pueden realizar diferentes aplicaciones a futuro.

Los resultados que confirman la funcionalidad del simulador fueron las gráficas obtenida al final del proceso comparadas con las gráficas de los datos del sismo, esto comprobó que el prototipo tiene la capacidad de desplazarse en los 3 componentes espaciales que intervienen en un movimiento telúrico. Estos ejes se operaron individualmente, ya que los datos adquiridos por CESMD lo requieren. El eje Z fue el que más inconvenientes presentó, la gráfica resultante vario en gran parte de la trayectoria con respecto a los datos reales, esto no indicó que en ese eje el efector final no se desplazó correctamente. El motivo de mayor peso es la ubicación del sensor, ya que este se encuentra apuntando a la base de la plataforma Stewart, donde los cables de todos los equipos se encuentran agrupados. Pese a ese error en la medición a futuro se puede realizar pruebas combinando los 3 ejes que se usaron anteriormente, siendo la limitación el espacio de trabajo del sismo, porque se reduce a medida que se agregan más ejes.

La plataforma Stewart en comparación con una mesa vibratoria es capaz de ejecutar todos los movimientos posibles en un espacio tridimensional, lo que permite alcanzar resultados más próximos a la realidad. Por otra parte, las mesas vibratorias necesitan un mayor número de componentes tanto mecánicos como eléctricos, mientras el diseño de un manipulador paralelo es más compacto,

reduciendo los componentes necesarios. Por último, una de las principales características de un robot paralelo es la capacidad de ser reprogramados, lo que amplía la cantidad de tareas o aplicaciones que realiza, algo que no es posible con las mesas vibratorias.

El prototipo a bajo costo presenta ciertas limitaciones como: la capacidad de memoria de la tarjeta de desarrollo, resolución de los sensores, control sobre los servomotores y funcionalidad del diseño mecánico. En la primera se programó la cinemática inversa, el control de los sensores y actuadores, y se ingresó los datos del sismo. Siendo los datos los que ocupan más memoria, por eso se decidió cambiar la frecuencia de muestreo del registro de datos real de 36000 datos a 2250 datos. Además, la precisión entre los datos y la plataforma era muy diferente; por ese motivo, se cambió la precisión de los valores de tal forma que la onda se alteró, pero mantuvo su patrón y los resultados no se vieron afectados.

Por otro lado, la resolución de los sensores ultrasónicos de 3 mm no permitió conocer el mínimo desplazamiento que puede realizar la plataforma. Según la cinemática inversa y las pruebas realizadas la plataforma se desplaza 0.5 mm como mínimo. Por lo que es necesario usar otros sensores con mayor resolución para conocer el desplazamiento correcto de la plataforma, también no se midió los ángulos que puede rotar la plataforma con un sensor, solo se tomó en cuenta los valores según la cinemática inversa. Este caso, esa información no era necesario para desarrollar la aplicación deseada.

Los actuadores que se usaron solo permitieron controlar el desplazamiento del efector final, ya que en la programación se ingresa la cantidad de grados que se desea desplazar el eje de cada servomotor, pero no hay forma de modificar la velocidad o aceleración a la cual se va a llegar a ese punto. Para evitar este problema se puede usar motores DC, con los cuales es posible realizar un control de la velocidad usando una señal de PWM que el Arduino maneja. En el caso de usar este tipo de actuador sería necesario implementar un sensor de retroalimentación de la posición del motor DC y un adaptador para la tarjeta Arduino que permita modificar

El diseño mecánico funcionó adecuadamente para el prototipo, mediante impresiones 3D se pudo replicar el comportamiento de las articulaciones esféricas. Para implementar a mayor escala este modelo sería necesario usar piezas mecánicas que resistan este tipo de esfuerzo. Otro factor del diseño mecánico fueron los brazos del servo motor, que su longitud limitaron el espacio de trabajo del efector final. En futuros trabajos se debe considerar la longitud de estos para conseguir el espacio de trabajo deseado.

La ubicación de los sensores ultrasónicos asegura una medición correcta siempre y cuando se desplace la plataforma sin rotarla, en decir, para otras aplicaciones deben ser cambiados. Esto sucede porque al rotar en un eje, dos sensores varían su medición sin que el efector final se haya desplazado, y a partir de ese momento cualquier desplazamiento realizado generará valores erróneos en la medición

La versatilidad de la programación permite realizar cambios sin necesidad de modificar o conocer la cinemática inversa del robot paralelo. Es decir, para variar la aplicación de la plataforma, solo es preciso cambiar el algoritmo de la función que se desea y no el control de la plataforma. Además, la programación se realizó con lenguaje C que es muy común en aplicaciones actuales. Por otro lado, si se efectúan cambios en el diseño mecánico, lo cual lleva a hacer variaciones en la cinemática inversa, es sencillo de realizar, porque en la programación las variables que se deben modificar están descritas como comentarios. Por lo tanto, los usuarios de la plataforma no necesitan conocer el control para lograr la aplicación deseada.

Recomendaciones

Los servomotores utilizados son una limitante para realizar un control más avanzado del robot paralelo, ya que solo se puede controlar la posición y no su velocidad. Por eso, sería necesario utilizar motores DC o servomotores de una gama mayor que permitan controlar rampas de velocidad y aceleración y así el simulador controlaría con mayor precisión su desplazamiento.

Para mejorar el funcionamiento de la plataforma se puede cambiar componentes mecánicos. Uno de estos es el brazo del servomotor, si este fuera de mayor

longitud el espacio de trabajo del manipulador aumentaría. De la misma manera, La articulación esférica también puede ser modificada, reduciendo su tamaño y mejorar su diseño se evitaría rozos o choques entre el servomotor y la articulación. Otra alternativa sería comprar las rótulas mecánicas, pero esto elevaría la inversión final.

Evitar procesos manuales en el armado de la estructura mecánica del robot paralelo, ya que se desea mantener la simetría en cada una de las conexiones. Mientras más exacta sea la ubicación de articulación del robot, su movimiento será más preciso y encontrar las coordenadas de cada componente, como el eje del servo motor y la conexión en el efector final, se vuelve una tarea simple y simétrica.

Verificar el comportamiento del simulador utilizando dos ejes en la misma prueba, es decir, juntar los datos adquiridos del CESMD para demostrar que el simulador construido con una plataforma Stewart puede replicar el sismo en condiciones más reales.

Utilizando otros sensores para medir el desplazamiento se puede calcular exactamente el espacio de trabajo del robot paralelo y medir con mayor precisión en la posición que se encuentra el efector final. También, es posible acoplar otros sensores para medir la velocidad o aceleración de la plataforma.

Para futuros análisis del prototipo se puede instrumentar las estructuras que se deseen probar para conocer el comportamiento de estas bajo la dinámica de un sismo, y a la vez conocer hasta qué punto el prototipo puede comportarse como un sismo con carga. Además, este estudio nos permitirá recoger más información sobre las fuerzas que intervienen en el diseño mecánico.

Incluir interfaz con el usuario de tal manera que sea fácil cambiar el tipo de prueba que se desea realizar, y sus parámetros como: tiempo o frecuencia, datos del sismo, etc. Además, automatizar el escalado de datos para obtener resultados una vez finalizado el proceso y no pasar por otro programa donde se modifique los datos para posteriormente presentar los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adriana Peralta (2016, 21 junio). Construcciones sismorresistentes [Online]. Disponible en <http://www.vistazo.com>
- [2] Varios (2014, 26 agosto). Ecuador esta asentado sobre tres sistemas de fallas geológicas [Online]. Disponible en <http://www.elcomercio.com>
- [3] Agencia Prensa Latina (2016,9 junio). Cifra de muertos por terremoto en Ecuador asciende a 668 [Online]. Disponible en <https://www.eltelegrafo.com>
- [4] Dr. Ramón, "Sismología," Posgrado en ciencias de la tierra, Madrid, España, 2011
- [5] M.Ceccarelli, E. Ottaviano, G Castello, "An Application of a 3-DOF Parallel Manipulator for Earthquakes Simulations," en Nombre de conferencia, Ferrara, Italy, 2015.
- [6] P. Lozano, "Diseño de un simulador de sismos," Tesis de pregrado, Ing. Técnica industrial especialidad mecánica, Universidad de Almería, Almería, España, 2013.
- [7] I. Corbi, Z. T. Rakicevic, "Shaking Table Testing for Structural Analysis," International journal of mechanics vol. 7, no. 4, 2013.
- [8] S. Molina, J Giner y P Jáuregui, "El tamaño de los terremotos: intensidad y magnitud," Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, vol. 12, no. 1, pp. 1132-9157, Mes, 2004.
- [9] K. Romero, "Implementación de una mesa vibratoria para el análisis dinámico de estructuras civiles a escala," Tesis de pregrado, Facultad de Ing. Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2016.
- [10] F. Molina, G. Verzeletti, G. Magonette, F. Vito, J Zapico, "Ensayo sísmico de estructuras," Física de la Tierra, vol. 11, no. x, pp. 285-305, 1999.
- [11] National Science Foundation (2009, 05 Junio). Standing strong [Online]. Disponible en

<https://www.nsf.gov>

[12] Juan Álvarez, "Diseño, Construcción, Instalación e Implementación de mesa vibratoria para la generación de sismos en estructuras a escala," Tesis de Maestría, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México, 2008.

[13] A. Coral, A. Sandoval, E. Rosero, J. Ramírez, D. Gómez "Simulador Sísmico Uniaxial Tele-operable para Modelos Estructurales de pequeña Escala," Tesis de pregrado, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

[14] Cristian Rangel, "Análisis de un robot paralelo de seis grados de libertad orientado a la simulación de sismos," Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

[15] M.Ceccarelli, G. Carbone, "A stiffness analysis for CaPaMan," DiMSAT, Frosinono, Italia, 2001.