



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL PARA LA
EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE
VIBRACIÓN DE LA TORRE EXENTA DEL MONUMENTO
HISTÓRICO RELIGIOSO SANTA ANA UBICADO EN LA
CIUDAD DE CUSCO**

PRESENTADA POR

**LUZ CARMEN HUALLPATAYPE CARPIO
KARLA PAOLA MASIAS ZANABRIA**

ASESORES

**ERNESTO ANTONIO VILLAR GALLARDO
JUAN MANUEL OBLITAS SANTA MARÍA**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA CIVIL

LIMA – PERÚ
2023



CC BY-NC-ND

Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede cambiar de ninguna manera ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRES

Facultad de
Ingeniería y
Arquitectura

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL PARA LA EVALUACIÓN
DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE VIBRACIÓN DE LA
TORRE EXENTA DEL MONUMENTO HISTÓRICO RELIGIOSO
SANTA ANA UBICADO EN LA CIUDAD DE CUSCO**

**TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA CIVIL**

PRESENTADA POR

**HUALLPATAYPE CARPIO, LUZ CARMEN
MASIAS ZANABRIA, KARLA PAOLA**

ASESORES

**MAG. ING. ERNESTO ANTONIO VILLAR GALLARDO
MAG. ING. JUAN MANUEL OBLITAS SANTA MARÍA**

LIMA – PERÚ

2023

Esta tesis está dedicada a Dios, por darme energía día a día y haberme permitido culminar esta investigación; a mi madre, Sofia Carpio, quien fue padre y madre en todo momento, por toda la fe y voluntad que depositó en mí durante esta travesía tan dichosa para lograr ser mejor persona; a mis hermanos, por estar siempre a mi lado brindándome su apoyo incondicional y palabras de aliento.

Huallpataype Carpio, Luz Carmen

Esta tesis está dedicada a mis padres, quienes siempre han estado a mi lado brindándome apoyo inquebrantable y palabras de ánimo en momentos de dificultad; a mis hermanos, tías y primas por sus sinceros deseos de éxito; a mi compañero de vida por su constante apoyo; a mí misma por la perseverancia, esfuerzo y trabajo, por nunca rendirme a pesar de las dificultades.

Masias Zanabria, Karla Paola

Agradezco a Dios por forjar mi camino al éxito y permitirme aportar a la sociedad a partir de todo el conocimiento adquirido.

La ejecución de este proyecto ha contado con la contribución invaluable de numerosas personas. En ese sentido, expreso mi profundo agradecimiento a mis asesores, Mag. Ernesto Antonio Villar Gallardo y Mag. Juan Manuel Oblitas Santa María, por la labor que desempeñaron en mi formación profesional y por haber inspirado muchas de las ideas contenidas en esta investigación; y, a los ingenieros, Mijaíl Montesinos Escobar y Matt Airton Valer Medina, por haberme brindado la oportunidad de explorar en el campo del análisis modal operacional.

Huallpataype Carpio, Luz Carmen

Mi más profundo agradecimiento a la Universidad de San Martín de Porres por haberme acogido e instruido académicamente; a mis mentores, el Mag. Ernesto Antonio Villar Gallardo y el Mag. Juan Manuel Oblitas Santa María, sin su guía constante esto no hubiera sido posible; a los ingenieros, Mijaíl Montesinos Escobar y Matt Airton Valer Medina, por haber compartido conmigo sus conocimientos en el campo del análisis modal operacional.

Masias Zanabria, Karla Paola

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	xix
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción de la Situación Problemática	1
1.2. Formulación del Problema	6
1.3. Objetivos de la Investigación	8
1.4. Justificación de la Investigación	8
1.5. Impacto de la Investigación	11
1.6. Alcance y Limitaciones de Estudio	13
1.7. Viabilidad de la Investigación	14
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes de la Investigación	16
2.2. Bases Teóricas	23
2.3. Definición de Términos Básicos	60
2.4. Hipótesis	65
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	

	Pág.
3.1. Diseño Metodológico	66
3.2. Diseño Muestral	68
3.3. Definición de Variables	74
3.4. Operacionalización de Variables	75
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	76
3.6. Técnicas e Instrumentos de Procesamiento de Datos	76
CAPÍTULO IV. DESARROLLO	
4.1. Mapa de Procesos	78
4.2. Documentación Histórica	80
4.3. Levantamiento Geométrico	100
4.4. Desarrollo de Elementos Finitos	105
4.5. Ensayos de Identificación Modal	124
4.6. Calibración del Modelo Numérico	161
CAPÍTULO V RESULTADOS	
5.1. Modelamiento Geométrico	164
5.2. Propiedades Modales de Vibración	167
5.3. Calibración de Modelo Numérico	179
CAPÍTULO V. DISCUSION DE RESULTADOS	
6.1. Validez de Hipótesis	182
6.2. Contrastación de Antecedentes	188
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
FUENTES DE INFORMACIÓN	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2. 1 <i>Método de Solo Salida</i>	42
Tabla 2. 2 <i>Propiedades Mecánicas de Mampostería de Piedra</i>	58
Tabla 3. 1 <i>Definición Operacional de Variables</i>	75
Tabla 3. 2 <i>Operacionalización de Variables</i>	75
Tabla 4. 1 <i>Propiedades de Piedra Irregular</i>	113
Tabla 4. 2 <i>Módulo de Elasticidad para Madera Latifoliadas</i>	114
Tabla 4. 3 <i>Análisis Modal de la Estructura</i>	119
Tabla 4. 4 <i>Especificaciones de los Transductores</i>	128
Tabla 4. 5 <i>Descripción del Setup 1</i>	131
Tabla 4. 6 <i>Descripción del Setup 2</i>	132
Tabla 4. 7 <i>Descripción del Setup 3</i>	133
Tabla 4. 8 <i>Descripción del Setup 4</i>	134
Tabla 4. 9 <i>Descripción del Setup 5</i>	135
Tabla 4. 10 <i>Descripción del Setup 6</i>	136
Tabla 4. 11 <i>Descripción del Setup 7</i>	137
Tabla 4. 12 <i>Descripción del Setup 8</i>	138
Tabla 4. 13 <i>Descripción del Setup 9</i>	139
Tabla 4. 14 <i>Descripción del Setup 10</i>	140
Tabla 4. 15 <i>Descripción del Setup 11</i>	141
Tabla 4. 16 <i>Descripción del Setup 12</i>	142

	Pág.
Tabla 4. 17 <i>Descripción del Setup 13</i>	143
Tabla 4. 18 <i>Coordenadas de Nodos Geométricos y de Medida</i>	144
Tabla 4. 19 <i>Resultados Campaña Experimental</i>	161
Tabla 5. 1 <i>Análisis Modal de la Estructura</i>	168
Tabla 5. 2 <i>Resultados en el Modelamiento Numérico</i>	169
Tabla 5. 3 <i>Resultados de OMA - Frecuencias Naturales</i>	172
Tabla 5. 4 <i>Comparación de Resultados f_{num} y f_{exp}</i>	175
Tabla 5. 5 <i>Coeficiente de Amortiguamiento</i>	176
Tabla 5. 6 <i>Datos Mac</i>	178
Tabla 5. 7 <i>MAC – Primera Calibración</i>	179
Tabla 5. 8 <i>MAC – Segunda Calibración</i>	180
Tabla 5. 9 <i>Tabla de Comparación - MAC</i>	181
Tabla 6. 1 <i>Discusión de la Hipótesis General</i>	183
Tabla 6. 2 <i>Discusión de la Hipótesis Específico 1</i>	184
Tabla 6. 3 <i>Parámetros Modales de Vibración</i>	185
Tabla 6. 4 <i>Discusión de la Hipótesis Específico 2</i>	186
Tabla 6. 5 <i>Resultados de Calibración de Parámetros Modales</i>	187
Tabla 6. 6 <i>Discusión de la Hipótesis Específico 3</i>	188
Tabla 6. 7 <i>Discusión de Antecedente Internacional</i>	189
Tabla 6. 8 <i>Discusión de Antecedente Nacional</i>	190

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. 1 <i>Patrimonio Cultural en Asia, África y Europa</i>	2
Figura 1. 2 <i>Inmuebles Declarados Patrimonio Cultural de la Nación</i>	2
Figura 1. 3 <i>Monumentos Históricos Religiosos en la Región Cusco</i>	3
Figura 1. 4 <i>Construcciones Afectadas Durante Sismos en el Perú</i>	5
Figura 1. 5 <i>Diagrama de Causa y Efecto</i>	7
Figura 2. 1 <i>Complejidad del Modelado de un Puente en Arco</i>	25
Figura 2. 2 <i>Procedimientos de Evaluación Estructural</i>	27
Figura 2. 3 <i>Patologías del Templo Compañía de Jesús</i>	28
Figura 2. 4 <i>Patologías del Templo Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey</i>	29
Figura 2. 5 <i>Características Generales del Escáner</i>	31
Figura 2. 6 <i>Escaneo Laser 3D en Pontevedra</i>	32
Figura 2. 7 <i>Proceso de Adquisición Geométrica en la iglesia de Huaro</i>	34
Figura 2. 8 <i>Aplicación de la Técnica de Fotogrametría</i>	35
Figura 2. 9 <i>Pruebas de Vibración Forzada</i>	37
Figura 2. 10 <i>Actuadores Utilizados para la Prueba Modal Combinada</i>	39
Figura 2. 11 <i>Dispositivos de Excitación</i>	41
Figura 2. 12 <i>Sistema de Monitoreo Dinámico de Estructuras</i>	43
Figura 2. 13 <i>Pruebas de Vibración Ambiental</i>	44
Figura 2. 14 <i>Método de Peak Picking</i>	46
Figura 2. 15 <i>Algoritmo de FDD</i>	47
Figura 2. 16 <i>Algoritmo del SSI</i>	49
Figura 2. 17 <i>Esquema de Estabilización del SSI</i>	50

	Pág.
Figura 2. 18 <i>Gráficos de EFDD y SSI del Templo Minerva Medica.</i>	51
Figura 2. 19 <i>Ensayos para Calibración de Modelos Numéricos</i>	52
Figura 2. 20 <i>Representación del FMAC</i>	54
Figura 2. 21 <i>Clasificación de la Mampostería de Piedra-Elevacion</i>	55
Figura 2. 22 <i>Clasificación de la Mampostería de Piedra-Transversal</i>	56
Figura 2. 23 <i>Diagrama del Proceso de Fabricación de Adobe</i>	59
Figura 3. 1 <i>Plano de la Ciudad de Cusco dentro del Reino Tahuantinsuyo</i>	69
Figura 3. 2 <i>Vista de la Torre Exenta</i>	71
Figura 3. 3 <i>Campanario y Vanos – Arco de Medio Punto</i>	71
Figura 3. 4 <i>Alero con Rollizos y Canes de Madera</i>	72
Figura 3. 5 <i>Base de la Torre (Mampostería de Piedra)</i>	72
Figura 3. 6 <i>Contexto Urbano de Cusco en 1650</i>	73
Figura 3. 7 <i>Evidencia Grafica de la Torre Exenta</i>	74
Figura 4. 1 <i>Mapa de Procesos</i>	78
Figura 4. 2 <i>Ubicación del Templos en Cusco</i>	81
Figura 4. 3 <i>Ubicación del Templo Santa Ana en el Centro Histórico</i>	83
Figura 4. 4 <i>Sector Urbano del Templo de Santa Ana, en 1643</i>	84
Figura 4. 5 <i>Plano Catastro de la Torre Exenta</i>	91
Figura 4. 6 <i>Imágenes del Templo Santa Ana – 1945 y 1953</i>	94
Figura 4. 7 <i>Ficha de Inspección Visual</i>	99
Figura 4. 8 <i>Procedimiento Antes de la Recolección de Datos</i>	100
Figura 4. 9 <i>Puntos de Referencia</i>	101
Figura 4. 10 <i>Modelo de Dron Utilizado</i>	101
Figura 4. 11 <i>Plan de Vuelo Dron al Entorno de la Torre Exenta</i>	102
Figura 4. 12 <i>Nube de Puntos Dispersa en la Torre Exenta</i>	103
Figura 4. 13 <i>Nube de Puntos Densa de la Torre Exenta</i>	104
Figura 4. 14 <i>Modelo de Enmallado de la Torre Exenta</i>	104
Figura 4. 15 <i>Enmallado con Textura de Colores</i>	105
Figura 4. 16 <i>Toma de Medidas de la Torre Exenta del Templo Santa Ana</i>	106
Figura 4. 17 <i>Levantamiento Geométrico-AutoCAD 3D</i>	107
Figura 4. 18 <i>Desnivel Vehicular con la Torre Exenta</i>	108
Figura 4. 19 <i>Distribución de Vanos en la Torre Exenta</i>	109

	Pág.
Figura 4. 20 <i>Formato DXF de la Torre Exenta</i>	110
Figura 4. 21 <i>Torre Exenta del Templo Santa Ana en SAP 2000</i>	111
Figura 4. 22 <i>Definición de la Mampostería de Adobe</i>	112
Figura 4. 23 <i>Definición de la Mampostería de Piedra Irregular</i>	113
Figura 4. 24 <i>Definición de la Madera</i>	114
Figura 4. 25 <i>Dibujo de Shell y Frame</i>	116
Figura 4. 26 <i>División de Shell-Elementos Finitos</i>	116
Figura 4. 27 <i>Resultado de la Torre Exenta</i>	117
Figura 4. 28 <i>Desplazamiento de la Torre Exenta</i>	118
Figura 4. 29 <i>Forma Modal de la Estructura</i>	120
Figura 4. 30 <i>Ubicación de los Puntos en el Plano</i>	123
Figura 4. 31 <i>Replanteo de Puntos</i>	125
Figura 4. 32 <i>Esquema Explicativo de la Aplicación de OMA</i>	126
Figura 4. 33 <i>Acelerómetros</i>	128
Figura 4. 34 <i>Data Logger</i>	129
Figura 4. 35 <i>Data Logger</i>	129
Figura 4. 36 <i>Acelerómetros Fijos en x-y</i>	130
Figura 4. 37 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 7.</i>	131
Figura 4. 38 <i>Registro de Datos Setup 1 – Duración 10 min.</i>	131
Figura 4. 39 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 7</i>	132
Figura 4. 40 <i>Registro de Datos Setup 2 – Duración 10 min.</i>	132
Figura 4. 41 <i>Acelerómetro móvil en Nodo 6</i>	133
Figura 4. 42 <i>Registro de Datos Setup 3 – Duración 10 min.</i>	133
Figura 4. 43 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 8</i>	134
Figura 4. 44 <i>Registro de Datos Setup 4 – Duración 10 min.</i>	134
Figura 4. 45 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 14</i>	135
Figura 4. 46 <i>Registro de Datos Setup 5 – Duración 10 min.</i>	135
Figura 4. 47 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 15</i>	136
Figura 4. 48 <i>Registro de Datos Setup 6 – Duración 10 min.</i>	136
Figura 4. 49 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 16</i>	137
Figura 4. 50 <i>Registro de Datos Setup 7 – Duración 10 min.</i>	137
Figura 4. 51 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 21</i>	138

	Pág.
Figura 4. 52 <i>Registro de Datos Setup 8 – Duración 10 min.</i>	138
Figura 4. 53 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 24</i>	139
Figura 4. 54 <i>Registro de Datos Setup 9 – Duración 10 min</i>	139
Figura 4. 55 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 23</i>	140
Figura 4. 56 <i>Registro de Datos Setup 10 – Duración 10 min.</i>	140
Figura 4. 57 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 27</i>	141
Figura 4. 58 <i>Registro de Datos Setup 11 – Duración 10 min.</i>	141
Figura 4. 59 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 26</i>	142
Figura 4. 60 <i>Registro de Datos Setup 12 – Duración 10 min.</i>	142
Figura 4. 61 <i>Acelerómetro Móvil en Nodo 28</i>	143
Figura 4. 62 <i>Registro de Datos Setup 13 – Duración 10 min.</i>	143
Figura 4. 63 <i>Nodos y Vectores de Medición – ARTeMIS Modal PRO</i>	146
Figura 4. 64 <i>Registro de Aceleración vs Tiempo</i>	147
Figura 4. 65 <i>Transformada de Fourier – Torre Exenta</i>	150
Figura 4. 66 <i>Diagrama de Densidad Espectral – EFDD</i>	152
Figura 4. 67 <i>Diagrama de Densidad Espectral – SSI</i>	156
Figura 4. 68 <i>Calibración 1</i>	162
Figura 4. 69 <i>Calibración 2</i>	163
Figura 5. 1 <i>Ortomosaicos de la Torre Exenta</i>	165
Figura 5. 2 <i>Modelado de la Torre Exenta en AutoCAD 3D</i>	167
Figura 5. 3 <i>Representación Gráfica de las Frecuencia - EF</i>	169
Figura 5. 4 <i>Forma Modal 1 y 2</i>	170
Figura 5. 5 <i>Función de Densidad Espectral Promedio -EFDD</i>	171
Figura 5. 6 <i>Función de Densidad Espectral Promedio -SSI</i>	171
Figura 5. 7 <i>Datos Comparativos entre Métodos de Identificación Modal</i>	172
Figura 5. 8 <i>Formas Modales – Artemis PRO</i>	173
Figura 5. 9 <i>Datos Comparativos entre Experimental y Numérico</i>	175
Figura 5. 10 <i>Representación Gráfica de Frecuencia y Amortiguamiento</i>	176
Figura 5. 11 <i>Representación sin Calibración – MAC</i>	178
Figura 5. 12 <i>Representación Calibrado 1 - MAC</i>	179
Figura 5. 13 <i>Representación Calibrado 2 - MAC</i>	180
Figura 5. 14 <i>Comparación MAC</i>	181

RESUMEN

El Análisis Modal Operacional (OMA, por su sigla en inglés) es una técnica fundamental para evaluar las propiedades dinámicas de vibración (modos de vibración, coeficientes de amortiguamiento y frecuencias naturales) identificadas mediante ensayos no destructivos. En este caso de la Torre Exenta, a partir del OMA se determinó un modelo numérico calibrado que sirvió como base para que se continúen los estudios en el campo de análisis y diagnóstico estructural para futuras intervenciones.

La investigación utilizó una metodología a nivel explicativo cuantitativa. La muestra es de planta cuadrangular irregular, con 17.93m de altura, mampostería de piedra y adobe con cubierta de tejas cerámicas.

Se obtuvo la identificación modal a partir de ensayos experimentales procesados en el programa ARTeMIS Modal Pro, de igual forma, se ejecutó un modelo numérico de elementos finitos (EF) en el programa SAP 2000. Se hizo una evaluación de los resultados del ensayo experimental y del modelo numérico, obteniéndose el coeficiente de semejanza modal MAC, a partir de ello se desarrolló el proceso de calibración.

Se determinaron: 1) parámetros modales de la estructura, específicamente en el primer y segundo modo de vibración, con frecuencias de 4.092 Hz en la dirección "Y" y 4.182 Hz en la dirección "X"; 2) amortiguamientos de 3.201% y 4.097%; y, 3) coeficientes de semejanza modal MAC de 0.88 y 0.98, respectivamente.

Se concluyó que el modelo numérico calibrado, a partir de la identificación modal obtenida en la campaña experimental, representa aceptablemente la respuesta de la Torre Exenta.

Palabras clave: Análisis Modal Operacional, parámetros modales dinámicos, modelo numérico, ARTeMIS Modal Pro, semejanza modal MAC

ABSTRACT

Operational Modal Analysis (OMA) is a fundamental technique for evaluating dynamic vibration properties (vibration modes, damping coefficients and natural frequencies) identified through non-destructive testing. In this case of the Exenta Tower, a calibrated numerical model was determined from the OMA that served as a basis for continuing studies in the field of structural analysis and diagnosis for future interventions.

The research used a quantitative explanatory methodology. The sample has an irregular quadrangular floor plan, 17.93m high, stone and adobe masonry with a ceramic tile roof.

The modal identification was obtained from experimental tests processed in the ARTeMIS Modal Pro program, likewise, a finite element (FE) numerical model was executed in the SAP 2000 program. An evaluation of the results of the experimental test was made and of the numerical model, obtaining the MAC modal similarity coefficient, from which the calibration process was developed.

The following were determined: 1) modal parameters of the structure, specifically in the first and second vibration modes, with frequencies of 4,092 Hz in the "Y" direction and 4,182 Hz in the "X" direction; 2) damping of 3.201% and 4.097%; and, 3) MAC modal similarity coefficients of 0.88 and 0.98, respectively.

It was concluded that the calibrated numerical model, based on the modal identification obtained in the experimental campaign, acceptably represents the response of the Exenta Tower.

Keywords: Operational Modal Analysis, dynamic modal parameters, numerical model, ARTeMIS Modal Pro, MAC modal similarity

NOMBRE DEL TRABAJO

R5-TESIS-LUZ_CARMEN_HUALLPATAYP
E_CARPIO,_KARLA_PAOLA_MASIAS_ZA
NABRIA[1].docx

AUTOR

KARLA PAOLA MASIAS ZANABRIA

RECUENTO DE PALABRAS

40351 Words

RECUENTO DE CARACTERES

227294 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

243 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

50.1MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 28, 2023 1:25 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Oct 28, 2023 1:28 PM GMT-5

● 16% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base i

- 14% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 8% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico

**USMP**
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRESFacultad de
Ingeniería y
Arquitectura**Biblioteca FIA**Juana Chunga Rodríguez
Bibliotecóloga

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, es un hecho que las sociedades modernas están muy interesadas en preservar el patrimonio arquitectónico, uno de los vínculos más importantes entre las generaciones antiguas y las actuales. Para protegerlo y garantizar la seguridad estructural, este patrimonio debe ser conservado y, si es necesario, restaurado, por lo que a menudo se requieren diversas obras técnicas para lograrlo. Sin embargo, las restauraciones de edificios pueden ser ineficaces y no producir las mejoras esperadas en las estructuras.

Respecto al Análisis Modal Operacional (OMA, por su sigla en inglés), Ramos (2007) señaló que es una técnica no destructiva, que trabaja únicamente bajo vibración ambiental, por lo que no crea ningún efecto negativo sobre las estructuras medidas, siendo respetuoso con el patrimonio, es por ello que la metodología del OMA implica la colocación de sensores de vibración, como acelerómetros, en puntos estratégicos de la estructura. Estos sensores registran las vibraciones que ocurren naturalmente durante la operación normal de la estructura, como las generadas por el viento, el tráfico, las máquinas o cualquier otro factor ambiental. Luego, se utiliza un conjunto de algoritmos y técnicas matemáticas para procesar los datos recopilados y extraer los modos de vibración, así como también las frecuencias naturales.

En ese sentido, en el presente trabajo de investigación, se determinó lo siguiente:

- El **Modelamiento geométrico** se realizó utilizando la técnica de la fotogrametría aérea la cual implicó tomar fotografías de la estructura de múltiples ángulos y luego utilizó el software Agisoft Metashape para crear un modelo 3D de la Torre Exenta.
- Para hallar las **Propiedades modales de vibración** se requiere obtener datos de respuesta de la estructura ante excitaciones específicas como las vibraciones y esto se obtuvo mediante los acelerómetros que registraron la respuesta de estructura frente a las excitaciones ambientales. Estos datos registrados se sometieron a un análisis para descomponer las señales en componentes de coeficientes de amortiguamiento, modos de vibración como también, las frecuencias naturales.
- Para realizar la **Calibración del modelo numérico** se optimizaron los valores de los parámetros identificados y se redujeron las diferencias entre la respuesta experimental y la respuesta numérica, datos que fueron validados por el coeficiente de semejanza (MAC).

En resumen, el OMA es una técnica poderosa y versátil para obtener información sobre las características dinámicas de una estructura, en base a mediciones de vibración realizadas durante su campaña experimental.

El estudio se centra en la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso del Templo Santa Ana, el propósito principal fue evaluar las propiedades dinámicas de vibración de la estructura mediante técnicas no destructivas basadas en ensayos de vibraciones ambientales como el OMA.

La importancia de esta investigación radica en que sus conclusiones contribuyen al campo del conocimiento sobre la evaluación de las propiedades dinámicas de monumentos históricos, así como al uso de técnicas no destructivas con el fin de comprender la respuesta a vibraciones de la Torre Exenta.

Esta tesis presenta el siguiente esquema: en el **primer capítulo** se aborda la situación problemática, se formula el problema y se plantean los objetivos. También abarca la relevancia teórica y práctica del estudio, así

como sus alcances, limitaciones y viabilidad. En el **segundo capítulo** se presenta el marco teórico, donde se exponen los antecedentes nacionales e internacionales, así como los conceptos teóricos fundamentales para comprender el desarrollo del estudio; se formulan las hipótesis y se entrega un glosario. En el **tercer capítulo** se describe la metodología aplicada en la investigación, se define la población y muestra, se operacionalizan las variables y se explican las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección y procesamiento de datos. En el **cuarto capítulo** se ejecutó la aplicación del OMA en la Torre Exenta del Templo de Santa Ana, detallando las pruebas de vibración ambiental y la caracterización de los parámetros modales. En el **quinto capítulo** se presentan los hallazgos derivados del estudio, desglosando los hallazgos de cada análisis realizado. En el **sexto capítulo** se discuten los resultados alcanzados. Finalmente, se entregan cuatro conclusiones, nueve recomendaciones, las fuentes de información y los anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

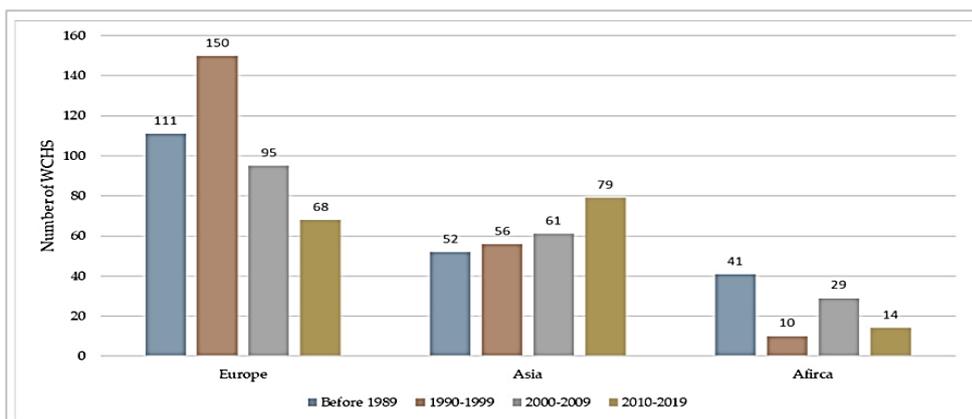
1.1. Descripción de la Situación Problemática

En 1972, la UNESCO estableció el Comité del Patrimonio Mundial (Meskell, 2013), con el propósito de salvaguardar el patrimonio de valor universal excepcional. Desde entonces, este Comité ha desarrollado un análisis comparativo de diferentes sitios patrimoniales de los países miembros que se adhieren a la "Convención para la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural". Asimismo, el Comité ha añadido elementos del patrimonio que cumplen los criterios de la Lista del Patrimonio Mundial (LPM) de la UNESCO y ha reconocido otros como parte del patrimonio mundial.

En el estudio realizado por Yao et al., (2021), se recopilaron datos estadísticos sobre la cantidad de estructuras patrimoniales en Asia, África y Europa en diferentes décadas (Figura 1.1). En general, se observó que el número de sitios europeos en la LPM tuvo un aumento inicial, seguido de una disminución; mientras que Asia mostró una tendencia constante al alza y aún posee un potencial de crecimiento. Por otro lado, África mostró inestabilidad y fluctuaciones, aunque en comparación con Eurasia, tuvo un número menor de sitios en la LPM durante varios periodos, experimentando su mayor crecimiento en la década de 2000.

Figura 1. 1

Patrimonio Cultural en Asia, África y Europa



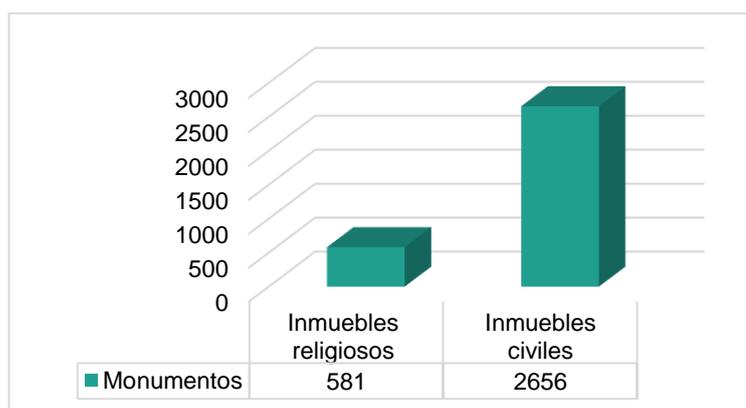
Nota: Número de patrimonios culturales en décadas de 1973-2019

Fuente: Yao et al., 2021

En el Perú, se pueden encontrar numerosas edificaciones históricas (ver Figura 1.2) que representan una parte fundamental de la identidad cultural del país. Estas construcciones no solo son un símbolo cultural, sino que también desempeñan un papel significativo en la economía local, ya que atraen el turismo y generan ingresos para las comunidades (Aguilar et al., 2016). Específicamente, la ciudad del Cusco destaca por su riqueza histórica y su gran cantidad de edificaciones patrimoniales, que presenta un valor arquitectónico e histórico teniendo en consideración sus templos coloniales construidos durante los siglos XVI al XVIII.

Figura 1. 2

Inmuebles Declarados Patrimonio Cultural de la Nación



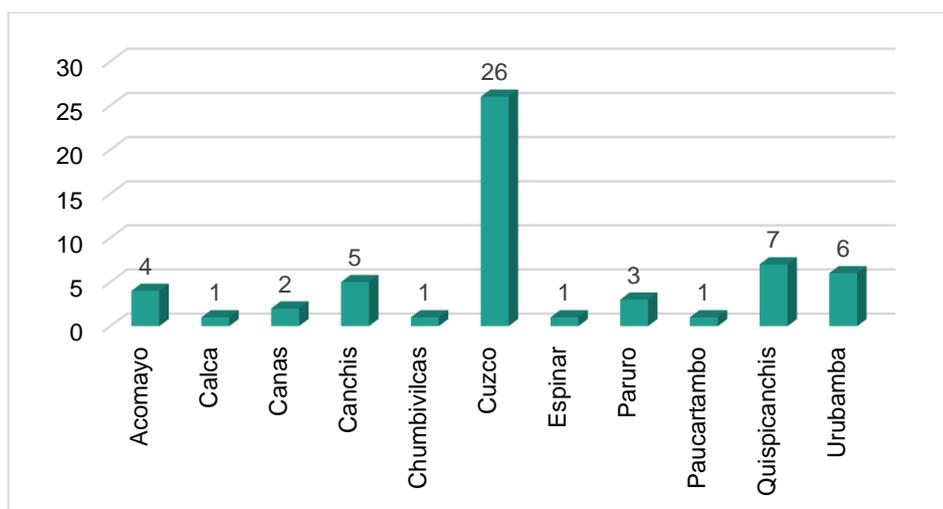
Elaborado por: las autoras

Con el pasar de los años los monumentos históricos se encuentran en constante riesgo a causa de los terremotos acontecidos en la ciudad debido a que el Perú presenta una actividad sísmica, por lo tanto, estos templos presentan vulnerabilidad estructural como lo indica Lourenco et al., (2013) que las estructuras patrimoniales de mampostería debido al deterioro y daño son vulnerables a los terremotos. Además, se menciona que los materiales empleados muestran una limitada capacidad de resistencia, y la mayoría de las vinculaciones entre los elementos estructurales se consideran insuficientes.

Según UNESCO la ciudad de Cusco está considerada como patrimonio cultural de la Humanidad por el enorme acervo patrimonial que posee, dentro de ellos se considera sus templos católicos que es pilar del símbolo de religiosidad de los habitantes de la ciudad, éstos conforman el conjunto de monumentos históricos de la ciudad, que según el Ministerio de Cultura son 57 (Figura 1.3), por lo que resulta primordial el análisis y la conservación de éstos para prolongar su funcionalidad a través del tiempo.

Figura 1. 3

Monumentos Históricos Religiosos en la Región Cusco



Elaborado por: las autoras

Actualmente el órgano encargado de conservar los monumentos históricos en la ciudad es la dirección desconcentrada de

cultura de Cusco, quién lleva a cabo trabajos de estudios, análisis, diagnóstico e intervención restaurativa únicamente en los campos de la arqueología, arquitectura y obras de arte, siendo escasa o derogada la realización de estudios en el campo estructural, un aspecto común no sólo en nuestra ciudad, sino en diversas partes del mundo, así mismo lo mencionan Bayraktar et al., (2018) en su artículo, mencionan que la reconstrucción de monumentos históricos, en Turquía, normalmente se enfocan en conservar y restaurar las características arquitectónicas y las evaluaciones estructurales reciben menos atención, debido se están buscando alternativas en el ámbito de la ingeniería con el objetivo de mejorar la evaluación de las propiedades dinámicas de vibración de las estructuras y promover la conservación de este tipo de edificios, más aun considerando que para la intervención de este tipo de monumentos se tienen una serie criterios y principios establecidos en las diversas cartas internacionales del Patrimonio, a los cuales deben regirse, siendo uno de ellos “la mínima intervención de la obra”, por lo que resulta importante la propuesta del presente trabajo de investigación ya que evita realizar acciones de análisis en la estructura con acciones invasivas, sino proponiendo la utilización del análisis no destructivo “OMA” para evaluar las propiedades dinámicas de vibración de la torre exenta del templo Santa Ana, identificando experimentalmente modos de vibración, amortiguamiento y formas modales; aporte imprescindible para la determinación del grado de respuesta que tendrá esta edificación frente a un evento sísmico.

De acuerdo con el INDECI, Cusco se sitúa en una zona caracterizada por una alta actividad sísmica de tipo tectónico. A lo largo del último milenio, la zona urbana de Cusco ha sido afectada por varios sismos superficiales con magnitudes que han llegado a alcanzar los 5.0 grados. Algunos de estos sismos tuvieron lugar en los años 1650, 1905, 1950 y 1986, y se cree que podrían haber tenido su origen en fallas como Tambomachay, Qoricocha o incluso la probable falla de Cusco. Estos eventos sísmicos han resultado en significativas pérdidas, tal como lo menciona Silgado (1978), y la recuperación de la ciudad ha sido un proceso largo y arduo. En este escenario, la falla Tambomachay representa uno de los potenciales generadores de peligro sísmico latente para Cusco. Además, su

ubicación adyacente a la ciudad y la constante actividad registrada en los últimos años acentúan su importancia en términos de riesgo sísmico.

Ajeno a ello, los terremotos o sismos en la ciudad del Cusco, originan daños estructurales, patrones de fallas y mecanismo de colapso en los diferentes tipos de los templos coloniales, como se puede apreciar en la Figura 1.4 (a-b); así, las construcciones arquitectónica y estructural de las iglesias del Cusco exterioriza una relación del mecanismo de falla experimentado por las iglesias durante los terremotos o sismos, así mismo indica que es de suma urgencia comprender la vulnerabilidad sísmica de estas estructuras para diseñar planes de mitigación.

La protección y conservación de los monumentos históricos ante los terremotos implica la implementación de medidas de mitigación sísmica. Esto puede incluir el refuerzo estructural, el instalar sistemas de aislamiento sísmico, la consolidación de elementos decorativos, la monitorización de la estructura y la planificación de la respuesta ante emergencias sísmicas. Estas medidas pueden ayudar a reducir los efectos destructivos de los terremotos y preservar el patrimonio histórico para las generaciones futuras.

Figura 1. 4

Construcciones Afectadas Durante Sismos en el Perú



(a)

(b)

Nota: a) Monumento Histórico Artístico Santísima Trinidad de Misca, esta presenta fisuras, desprendimientos y deslizamientos en la parte exterior e interior de los muros. (Andina, 2014). b) Templo Santo Domingo, fue el patrimonio histórico cusqueño que más graves daños sufrió luego del terremoto de 1950

Fuente: Urbans Cusco, 2020

Situaciones que conlleva a ingenieros a desarrollar propuestas ingenieriles para el conocimiento de parámetros modales de vibración mediante ensayos que no agredan la originalidad y respeten la integridad del monumento con análisis no invasivos, en especial a aquellos con mayor antigüedad, siendo un desafío para la ingeniería, debido a su alta complejidad desde su comportamiento no lineal del material por lo que está construida su mampostería; geometría o irregularidades que presenta, de la misma forma los mecanismos de falla dentro y fuera de la estructura como es el caso del Templo de Santa Ana, específicamente su torre exenta, edificada entre 1550 hasta 1650.

Por lo tanto, la presente investigación tiene por finalidad utilizar un análisis no destructivo sobre la Torre Exenta del Templo Santa Ana, a través de fuentes de excitación ambiental, obteniendo finalmente los parámetros modales a partir de la respuesta estructural siendo un tema muy interesante en esta estructura histórica porque implica un monitoreo menos invasivo y un impacto mínimo en el valor cultural y artístico de la estructura.

1.2. Formulación del Problema

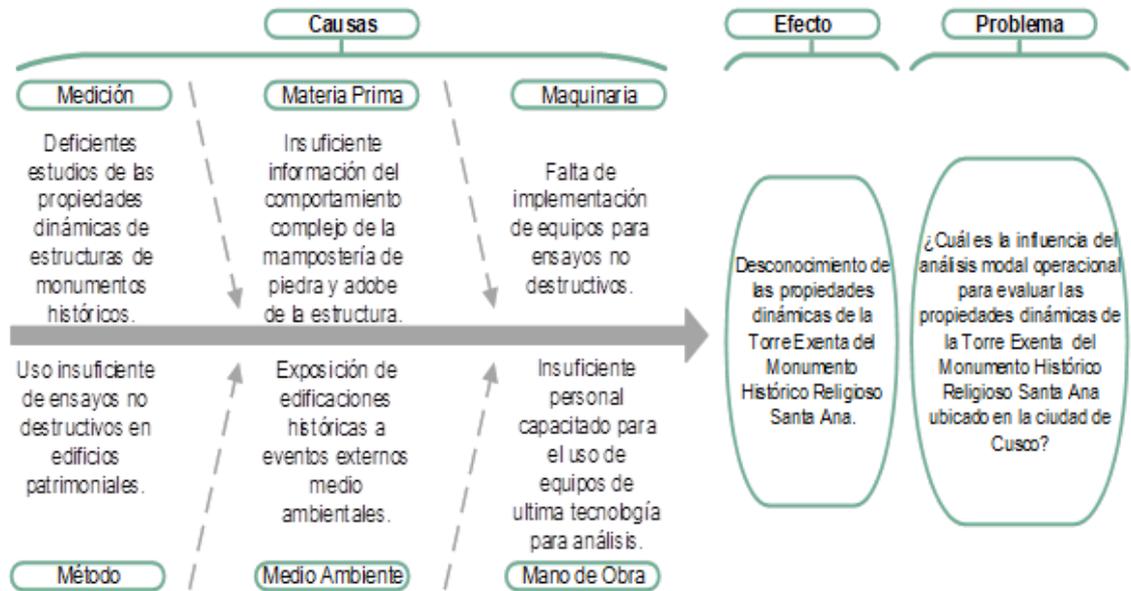
En Perú los trabajos de restauración, conservación y puesta en valor de edificios históricos no se centran en analizar su estructura ni su comportamiento dinámico para aportar soluciones prácticas a futuras intervenciones.

Considerando esta experiencia, es importante analizar las propiedades dinámicas de las estructuras para proteger los monumentos históricos de manera efectiva y proporcionar información en el campo del OMA tomando como punto de estudio la Torre Exenta del templo de Santa Ana.

Es por ello que se determina el problema general en base al análisis del estado situacional de la Torre Exenta, donde se identifica las causas y efectos que se define en el siguiente diagrama.

Figura 1. 5

Diagrama de Causa y Efecto



Elaborado por: las autoras

1.2.1. Problema General

PG: ¿Cuál es la influencia del análisis modal operacional para evaluar las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1: ¿Cuál es la importancia del levantamiento geométrico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco?

PE2: ¿Cuáles son las propiedades modales de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco?

PE3: ¿Cuál es el proceso para la calibración del modelo numérico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

OG: Determinar la influencia del Análisis Modal Operacional para evaluar las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.

1.3.2. Objetivos Específicos

OE1: Desarrollar el levantamiento geométrico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.

OE2: Determinar las propiedades modales de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.

OE3: Determinar la calibración el modelo numérico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.

1.4. Justificación de la Investigación

1.4.1. Importancia de la Investigación

La Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana tiene un valor significativo al formar parte del patrimonio histórico de la antigua capital incaica. Este monumento es uno de los ejemplos más emblemáticos del período colonial peruano. Fue erigido entre 1550 a 1650, importante atractivo turístico para la ciudad, construida sobre

una antigua plataforma ceremonial inca llamada Usnu, por lo que su conservación es primordial, dado el valor histórico, religioso y patrimonial, para salvaguardar su legado hacia futuras generaciones. También es designado como patrimonio arquitectónico, por lo que es de interés evaluar las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta por medio de un modelo experimental vs un modelo numérico de elementos finitos en relación al coeficiente de semejanza modal MAC lo cual servirá para que se continúen estudios en el campo de análisis y diagnóstico estructural para futuras intervenciones del objeto de estudio, considerando como técnica no destructiva a OMA (Análisis Modal Operacional), una herramienta fundamental que permitirá la obtención de la de respuesta de la estructura de la torre exenta a partir de las condiciones ambientales, y las fuerzas de servicio que inciden sobre la misma, todo ello respetando los criterios fundamentales establecidos en cartas y normas que rigen la intervención de monumentos patrimoniales promovidos por la UNESCO e ICOMOS, de esta manera se garantizará la mínima intervención en la edificación patrimonial y servirá de aporte, en futuras investigaciones, para su uso en el diagnóstico estructural de monumentos históricos artísticos, permitiendo a los profesionales a cargo de éstos mejorar sus propuestas de reforzamiento y consiguiente restauración y puesta en valor.

1.4.2. Justificación social

Los monumentos históricos se consideran como parte del patrimonio cultural, siendo elementos fundamentales de la identidad nacional. Estos monumentos no solo son testigos de la historia, el arte y la cultura peruana, sino que también enriquecen a la sociedad, promoviendo un sentido de pertenencia y cohesión. De acuerdo con la UNESCO, el concepto de patrimonio resalta la importancia de la cultura, ya que esta es una fuerza vital en las sociedades contemporáneas, impulsando la constante revalorización de culturas e identidades. Además, el patrimonio actúa como un medio esencial para transmitir experiencias, conocimientos y habilidades de una generación a otra. Para muchos, el patrimonio también es

una fuente de inspiración en el fomento de la creatividad e innovación, contribuyendo a la creación de productos culturales actuales y futuros.

1.4.3. Justificación económica

En el año 2018, Perú registró un ingreso de 4.895 millones de dólares provenientes del turismo, situándose como uno de los destinos más visitados en Sudamérica, ocupando la cuarta posición. Este fenómeno también beneficia económicamente a la región de Cusco. El turismo juega un rol significativo en la economía local, siendo Cusco renombrado por su centro histórico colonial y su invaluable patrimonio arquitectónico, como el templo de Santa Ana situado en el núcleo monumental. Esto convierte a Cusco en un destino turístico destacado, generando ingresos en diversos sectores como hotelería, gastronomía, artesanía, entre otros. La ciudad se destaca, además, por sus festividades ligadas a celebraciones y prácticas religiosas, como la Semana Santa, que atraen a numerosos visitantes. Estos ingresos tienen un impacto positivo en el desarrollo económico local, subrayando la importancia crucial de conservar sus valiosos recursos turísticos, en particular sus monumentos históricos.

1.4.4. Justificación técnico-científico

Considerando que en Cusco no se realizaron estudios sobre las propiedades dinámicas de vibración de las edificaciones históricas para proponer futuras intervenciones de conservación, la presente investigación proporciona información evaluando las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana de la ciudad de Cusco, a través del OMA como método de ensayo no destructivo. Lo que posibilitará, en futuras investigaciones, el diagnóstico estructural de la Torre Exenta, así como la sugerencia de técnicas de refuerzo estructural en caso fuese necesario y promoverá la revaloración del patrimonio cultural desde un enfoque técnico-científico, complementando los aspectos históricos y artísticos.

1.5. Impacto de la Investigación

1.5.1. Impacto Teórico

Reforzó la información acerca de la técnica OMA como un método de ensayo no destructivo que se emplea para conocer las propiedades de vibración de construcciones patrimoniales cuyo objetivo principal es preservar el valor histórico de los monumentos.

Aportó conocimientos con respecto al uso de ensayos no destructivos para caracterizar las propiedades dinámicas de vibración de construcciones patrimoniales sin causar daño físico. Estos ensayos permiten evaluar características como la frecuencia natural, el coeficiente de amortiguamiento y modos de vibración.

Brindó saberes antes de aplicar la técnica OMA, ya que se lleva a cabo una investigación del edificio y su historia. Esto implica el estudio de fotografías antiguas, artículos de investigación, testimonios de expertos y cualquier otra fuente relevante para comprender la construcción original. La documentación adecuada permite una futura intervención precisa y coherente.

Por lo tanto, el impacto teórico de la técnica OMA se centra en conocer las propiedades dinámicas de vibración de construcciones patrimoniales con la finalidad de tener estudios para futuras intervenciones. Estos aspectos contribuyen a conservar los edificios antiguos y garantizar su legado para las generaciones futuras.

1.5.2. Impacto Práctico

Se utiliza OMA como ensayo no destructivo por que cumple uno de los principios internacionales de la restauración que viene ser la mínima intervención.

Beneficia a la comunidad del distrito de Cusco situado en la provincia y región del mismo nombre, esto se debe a la disponibilidad de información fundamentada en un modelo numérico

calibrado que tiene relevancia para la continuidad de próximas investigaciones que conllevarán a futuras intervenciones y a la conservación de la Torre Exenta del templo Santa Ana y siga siendo una atracción histórica.

Tiene un valor turístico y económico ya que los monumentos históricos atraen a visitantes interesados en la historia y la cultura, generando un flujo turístico que beneficia a la comunidad local en términos de empleo, desarrollo económico sostenible e inversión.

Sirve a propietarios, investigadores, ingenieros y organismos de conservación ya que la actual investigación proporciona información precisa sobre las propiedades dinámicas de vibración de la estructura, permitiendo que se ejecute un análisis adecuado y un proceso decisorio para una conservación más efectiva del patrimonio.

Investigadores para profundizar estudios con respecto a la técnica OMA e implementar nuevas metodologías ingenieriles para una mejor evolución de las particularidades dinámicas de estructuras de este tipo de edificaciones antiguas.

Ingenieros ya que la investigación brinda información crucial sobre las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta. Esto ayuda a los ingenieros a comprender mejor la estructura, a diagnosticar y planificar intervenciones de restauración adecuadas.

Organismos de conservación y entidades reguladoras para utilizar la técnica del OMA como método no destructivo con el objetivo de respetar el principio de mínima intervención establecidos por organismos internacionales como la UNESCO e ICOMOS así mismo determinar directrices para la conservación y protección de este tipo de edificaciones.

La utilidad de esta investigación es que a partir del OMA se calibró un modelo numérico que sirve de base para el análisis estructural de la edificación y toma de decisiones para futuras intervenciones.

Esta tesis de investigación también sirve como un antecedente para aquellos investigadores que buscan tener información acerca del uso de la técnica OMA como método no destructivo y ponerlas en práctica en otros monumentos históricos.

1.6. Alcance y Limitaciones de Estudio

1.6.1. Alcances

La investigación se realizó en la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana, del distrito de Cusco situado en la provincia que pertenece al departamento del Cusco, se obtuvo la respuesta de la estructura frente a excitaciones ambientales.

Documentación histórica y análisis geométrico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana siendo objeto de estudio relevante para el avance de implementación de la OMA.

Determinar las propiedades dinámicas de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana y a partir de ello calibrar un modelo numérico confiable que sirva como base fiable para que se continúen con los estudios en el campo de análisis y diagnóstico estructural para futuras intervenciones del objeto de estudio.

El interés arquitectónico que presenta la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana, al tratarse de una edificación de atracción, adquiere suma relevancia para el turismo teniendo una incidencia económica en la ciudad de Cusco.

1.6.2. Limitaciones

Dentro de las limitaciones se tiene que el Monumento Histórico Religioso al ser propiedad del arzobispado del Cusco requiere de la presentación de una serie de requisitos para obtener el permiso de acceso para que se ejecuten los trabajos de análisis,

El personal encargado de administrar la Torre Exenta del templo de Santa Ana contaba con una disponibilidad limitada en cuanto horarios.

Otra limitación es el elevado costo asociado a la adquisición de equipos del método de análisis modal operacional, tales como los acelerómetros, cable J9T2A, data logger, lo cual demandó de una inversión económica significativa.

1.7. Viabilidad de la Investigación

El desarrollo se ejecutó en cuanto a 3 puntos, la viabilidad en el aspecto técnico, económico y social.

1.7.1. Viabilidad técnica

Se contó con la adquisición de los equipos técnicos y tecnológicos necesarios para que se desarrolle el método OMA en la Torre Exenta y uso libre de softwares, así como materiales de información publicada en libros, el acceso a artículos y tesis cuyos títulos se encuentren vinculados, al mismo tiempo se contó con el constante apoyo técnico de un asesor especialista en la temática.

1.7.2. Viabilidad económica

El estudio fue financiado con los recursos de los autores.

1.7.3. Viabilidad social

El proyecto fue viable por ser de interés del Arzobispado del Cusco como propietario del inmueble, así como de la Dirección Desconcentrada de Cultura del Cusco, investigadores y

profesionales a cargo de la conservación de los monumentos históricos, ya que antes de una intervención restaurativa es necesario conocer mediante datos fiables las propiedades dinámicas de la Torre Exenta por medio de un modelo numérico calibrado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

Se detalla una determinada cantidad de estudios referentes a la utilización de la técnica de OMA para la evaluación de propiedades dinámicas de vibración de diferentes estructuras en los que se puede mencionar en un ámbito internacional como nacional.

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En el estudio presentado en la tesis doctoral ***“Evaluación del daño en estructuras esbeltas y metodología de refuerzo con materiales compuestos frente a acciones dinámicas”***, Bru Orts (2020), analizó el comportamiento dinámico y estructural de diversas estructuras en este estudio. Se examinó tanto una chimenea como un campanario industrial construido con mampostería. También se investigaron estructuras de hormigón edificadas en la costa española en la década de 1950. Para la interacción dinámica en el campanario de la Catedral de Fiesole en Italia, se evaluaron aspectos como la rotación de la campana y las fuerzas de inercia generadas por esta. Además, se consideró la estructura global del campanario. En otro aspecto del estudio, se analizaron las causas subyacentes del agrietamiento de la mampostería en chimeneas industriales

y las dificultades de colapso asociados en dos chimeneas ubicadas en Manises (Valencia) y Agosto (Alicante). Además, se realizó un análisis de la torre Adoc 10 en Alicante, en la zona costera, centrándose en los efectos combinados de la corrosión y la actividad sísmica después de 40 años de procesos corrosivos. El objetivo aquí era evaluar la distribución de los patrones de daño a través de curvas de capacidad y demanda. En el contexto del estudio de vulnerabilidad sísmica de chimeneas industriales de mampostería, se enfocó en particular en la chimenea de agosto en Alicante. Los resultados resaltaron la relevancia de calibrar los parámetros mecánicos para lograr un comportamiento dinámico más eficiente en las estructuras analizadas. Con base en estos hallazgos, se propuso un sistema de refuerzo compuesto que podría prevenir el colapso estructural de la chimenea y se definieron patrones de daño estructural. En conjunto, este estudio resalta la importancia de una comprensión precisa de los comportamientos dinámicos y estructurales en una variedad de contextos, con aplicaciones que van desde la restauración patrimonial hasta evaluar la vulnerabilidad sísmica y esclarecer una propuesta de soluciones de refuerzo.

De la misma forma el estudio de Aşikoğlu et. al (2019) llamada “**Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure**” contiene un análisis de desempeño sísmico de la histórica mezquita Kurşunlu de Turquía antes y después de su remodelación. En cuanto a sus patologías, la mezquita ha sido objeto de varias intervenciones de rehabilitación, con la finalidad de mejorar su desempeño sísmico y su comportamiento estructural global, así mismo se investigó la efectividad de la rehabilitación sísmica de la Mezquita utilizando el método de los EF. Se realizaron mediciones de vibraciones ambientales para identificar sus propiedades modales, luego el modelo de EF fue calibrado y mejorado conforme a los datos obtenidos en campo. En ese sentido, dentro de la investigación los autores mencionan que la conservación de las estructuras históricas debe llevarse a cabo de acuerdo con el principio de mínima intervención tal como se admite en ICOMOS 2013. También hace mención de que la ingeniería estructural aplicada de forma convencional, como en las

estructuras modernas, muchas veces no es factible para las estructuras históricas. Por lo tanto, mencionan que se deben realizar un conjunto de actividades tanto cualitativas (como la inspección y la investigación histórica) como cuantitativas (como el análisis y seguimiento estructural).

En el artículo científico de Roselli et. al (2018) llamada “***Mutual validation between different modal analysis techniques for dynamic identification of the so-called Temple of Minerva Medica, Rome***” se describe un estudio de caso de aplicación al llamado Templo de Minerva Médica, Roma. Los datos de vibración ambiental se adquirieron en cuatro sesiones de adquisición de remo realizadas desde julio de 2016 hasta julio de 2017, que es un período de tiempo utilizable para evaluar el impacto de la reciente secuencia sísmica del centro de Italia. Realizaron un análisis de obtención de frecuencias modales a partir de vibraciones ambientales colocando pocos puntos de medición en la estructura del templo, así mismo aplicaron una variedad de técnicas de análisis modal al conjunto de datos registrados, entre ellos los métodos OMA, FRF y HVSR, que se basan en diferentes supuestos teóricos. Al finalizar su investigación concluyen en la relevancia, precisión y validez de las frecuencias modales proporcionadas por el monumento, mencionan que los datos proporcionados tienen una alta confiabilidad de los parámetros modales para el diagnóstico y monitoreo del estado daño de la estructura. La varianza de los parámetros modales obtenidos por cada técnica diferente se utilizó para proporcionar indicaciones sobre la fiabilidad de los valores medios. Todos los resultados que se obtuvieron a través de los métodos antes mencionados se compararon mediante un análisis estadístico básico, de acuerdo con dicha comparación se corroboró que los resultados fueron casi idénticos. En consecuencia, se pudo demostrar una base sólida para la validación mutua de los resultados, corroborando la confiabilidad de los hallazgos obtenidos.

En el artículo científico de Bayraktar et al. (2018) denominado, “***Restoration effects on experimental dynamic***

characteristics of masonry stone minarets. Materials and Structures”, aplicaron la técnica OMA para investigar los efectos de la restauración acerca de las particularidades dinámicas de los minaretes históricos (mezquitas musulmanas), de mampostería de piedra, para este propósito seleccionaron tres minaretes históricos en Turquía, entre ellos: The Gülbahar, Hacibası y Hacı Kasım. Para el desarrollo, primero hacen un análisis de los trabajos de restauración realizados en los minaretes. Posteriormente, las características dinámicas experimentales de los minaretes seleccionados se determinaron por medio del método de OMA antes y después de la restauración. Las frecuencias experimentales, las formas modales y las relaciones de amortiguamiento obtenidas antes y después de las restauraciones se evaluaron y se compararon entre sí. Después de toda una evaluación concluyeron que las intervenciones de restauración en los minaretes repercutieron positiva y negativamente en las estructuras del monumento, la restitución de piedras estropeadas y la consolidación de juntas afectaron positivamente en la rigidez estructural, pero redujeron en algunos casos los coeficientes de amortiguamiento. De manera general los autores sugieren que la restauración de minaretes históricos debe ser considerada por un equipo multidisciplinario de expertos, incluidos ingenieros, arquitectos y estructurales, ya que los trabajos de restauración afectan positiva y negativamente en el desempeño estructural de los minaretes de mampostería de piedra.

En su tesis doctoral Pachón García (2014) ***“Evaluación Estructural de Edificaciones Históricas mediante Análisis Modal Operacional (OMA)”*** mencionó que la conservación de patrimonio histórico es esencial por tratarse de elementos de atracción turística ya que inciden en la economía de diversas ciudades y países, por lo que conservarlas no solo es una necesidad cultural, sino una demanda económica. En su tesis, se examinan el comportamiento estructural de varios edificios notables: la Capilla de la Jura y la iglesia de Santiago en Jerez de la Frontera, España; el Teatro Romano de Cádiz en Cádiz, España; la Capilla del Palacio de Wurzburg en Alemania, y el Monasterio de San Jerónimo de

Buena Vista en Sevilla, España. Este análisis se lleva a cabo mediante pruebas de vibración ambiental con el propósito de que se caracterice dinámicamente el objeto de estudio. Estas pruebas son un paso crucial para actualizar de forma posterior del modelo de EM, lo que permitirá un análisis numérico más preciso del desempeño estructural del conjunto arquitectónico en cuestión. Al identificar las propiedades dinámicas, es posible mejorar y actualizar los modelos tridimensionales de EM. Esto contribuye significativamente a reducir la incertidumbre inicial que podría existir en cuanto a la geometría y a las particularidades mecánicas de los materiales utilizados en dichos modelos.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Choquemaki Mozo y Valer Medina (2023) en su investigación, ***“Diagnóstico estructural utilizando análisis modal operacional en edificaciones históricas; caso: templo de San Francisco de Asís de Marcapata provincia de Quispicanchis-Cusco”***, mencionaron que OMA es una metodología que permite que se estudie el comportamiento dinámico de una estructura por medio de metodologías no invasivas, además no interfieren las condiciones de funcionamiento, de modo que se puede realizar el proceso en su estado de operación. También mencionan que durante el desarrollo de este método de análisis se realiza la calibración de un modelo numérico basado en parámetros modales que se obtienen a partir del modelo experimental; para la obtención de datos recurrieron a ensayos experimentales de sistemas de medición, identificación modal y a métodos para procesar señales, además de realizar un modelo numérico y un proceso de calibración de equipos lograron obtener información de la estructura en su estado actual lo que sugeriría una correcta propuesta de intervención. Las pruebas experimentales llegaron a establecer los parámetros modales de la estructura en dos modos de vibración, en frecuencias que van de 3,2 Hz y 6,15 Hz. Estos valores modales sirvieron como la base para definir la función objetivo en el proceso de calibración, empleando el coeficiente de semejanza

modal MAC. Se alcanzaron resultados de un 95% y un 85% para los dos modos de vibración.

En la tesis Oré Espinoza & Suárez Cabellos (2021) titulada “**Calibración de un modelo numérico en elementos finitos de la iglesia de la Compañía de Jesús de la ciudad de Cusco**”, se llevó a cabo la calibración de un modelo utilizando el enfoque del método de elementos finitos para la iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco, un monumento histórico edificado en mampostería de piedra. Para lograrlo, se emplearon resultados de una campaña experimental que constó de cuatro etapas. La etapa primera se centró en recopilar información histórica sobre la construcción y modificaciones de la iglesia. En la segunda fase se presentaron los resultados de la campaña experimental, que comprendió la realización de mediciones geométricas, la detección de posibles anomalías y la determinación de parámetros dinámicos. La tercera etapa consistió en la creación de un modelo de elementos finitos basado en datos obtenidos a través de escaneo láser terrestre y fotogrametría aérea. Finalmente, en la última etapa del proceso de calibración, se aplicaron análisis de sensibilidad y técnicas de optimización con el objetivo de mejorar la precisión del modelo. Los resultados finales confirmaron que el modelo numérico representaba de manera adecuada la respuesta de la iglesia de acuerdo con los ensayos no destructivos realizados. En resumen, esta investigación permitió realizar una evaluación estructural que guía en la determinación de medidas sísmicas para proteger a las personas y prevenir daños en la edificación.

Silva Mondragón (2020) realizó estudios sobre métodos no destructivos usados en el análisis de edificaciones de adobe y quincha del siglo XX en la ciudad de Lima a través de su investigación denominada “**Aplicación de termografía infrarroja para el diagnóstico estructural de edificaciones históricas de adobe y quincha**” En su estudio, realizaron ensayos de laboratorio en bloques de concreto con objetos insertados y muros compuestos por diversos materiales con objetos incluidos.

En ambos casos, emplearon termografía activa y pasiva para la detección de anomalías estructurales, como grietas y fisuras. Los resultados indicaron que la termografía activa (SH) mejora la visualización de tales anomalías. Pero, no se evidenció que la termografía activa (HS) pueda detectar defectos de más de 9 cm de profundidad en muestras de concreto o más de 20 cm de profundidad en muros de adobe y piedra. El proceso de calentamiento después de apagar la fuente de calor fue observado durante 1 hora, sin detectar defectos simulados debido a objetos. A diferencia de la termografía activa, la termografía pasiva no mostró una mejora significativa en la detección y visualización de grietas y fisuras en comparación con la inspección visual. Ello se refleja por la discrepancia térmica depende de la cantidad de calor recibido en escenarios normales, sin una fuente de calor controlada. Por lo tanto, su estudio recomienda el uso de la termografía activa cuando se busque investigar anomalías estructurales.

En la investigación para lograr el grado de Magister de Sovero: Ancheyta & Martel (2014), titulada ***“OMA Tests and FEM Updating in Peruvian Archaeological Heritage: Chokepukio y Modal Identification Tests on Archaeological Heritage: The Case of Chokepukio”***, implicó un análisis de sensibilidad que permita ajustar los parámetros del modelo para que se ajusten de manera precisa a la realidad dentro del contexto para la identificación de parámetros modales en estructuras realistas, siendo crucial contar con un modelo numérico calibrado. En el marco de la investigación realizada, se presentó la calibración de un modelo numérico para un complejo arqueológico llamado Chokepukio, ubicado en la ciudad de Cusco. Esta estructura, que data de la época preincaica entre los siglos X y XIV d.C., se compone de muros de mampostería de piedra con mortero de barro. Para identificar los parámetros modales, se empleó la técnica de Análisis Modal Operacional (OMA). Luego, se realizó el proceso de calibración mediante un algoritmo de optimización, focalizando en aquellos parámetros que ejercen mayor efecto en la respuesta dinámica de la mampostería. Estos parámetros se identificaron mediante un análisis de sensibilidad. La investigación se dividió en dos artículos

presentados en eventos internacionales. El primero, se presentó en el congreso EVACES en Ouro Preto, Brasil. En dicho artículo, se ejecutaron 3 modelos de EF utilizando SAP2000, calibrando uno de ellos con base en los parámetros modales obtenidos en campo. El segundo artículo, fue presentado en el congreso IMAC-XXXII en Orlando, Florida, EE. UU. Aquí, se abordó la realización de tres modelos de EF desarrollados en Diana TNO, calibrando uno de ellos también con los parámetros modales obtenidos en campo. Estos trabajos representan un esfuerzo importante en la validación y calibración de modelos numéricos para estructuras arqueológicas, contribuyendo al entendimiento y preservación del patrimonio histórico.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Introducción

Se destaca que el rol de la ingeniería desempeña un papel fundamental en la conservación de edificaciones históricas y resulta de suma importancia en cualquier iniciativa de restauración. Además, hay que tener en cuenta que los edificios históricos deben ser tratados de forma diferente a los edificios modernos. El estudio de los monumentos históricos debe incluir diferentes campos de investigación que se complementen entre sí. Por ejemplo, cuando un ingeniero lleva a cabo la evaluación del estado actual de un edificio histórico, es esencial que colabore estrechamente con un equipo multidisciplinario compuesto por arqueólogos, historiadores y arquitectos. Esta colaboración es fundamental para obtener una comprensión integral del edificio y su contexto histórico (Lourenco, 2006).

Con el fin de realizar una evaluación precisa de las edificaciones históricas, es esencial obtener un conocimiento detallado de sus características. Por lo tanto, el primer paso reside en recabar información sobre los procesos de construcción de la estructura, lo que proporcionará una comprensión más profunda de su comportamiento. Luego, se pueden llevar a cabo diversos ensayos, que van desde medir las

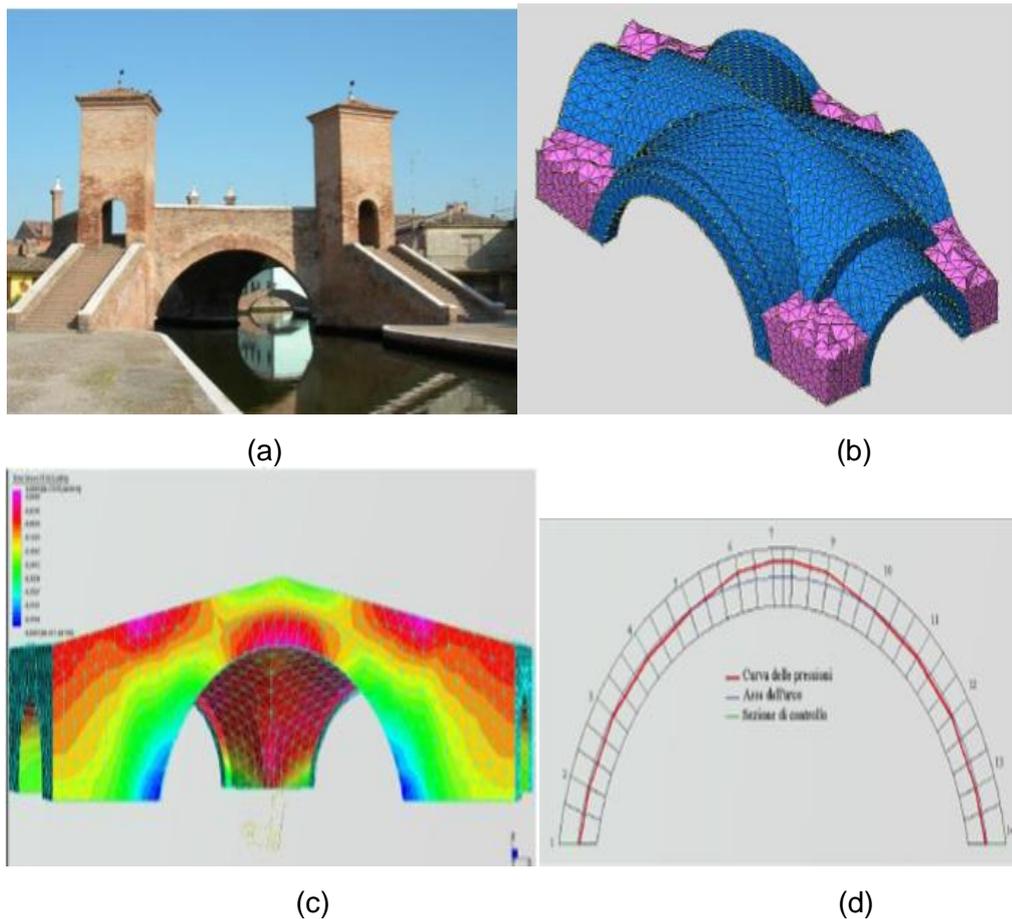
influencias ambientales mediante ensayos de aplicación directa, hasta realizar una caracterización geométrica detallada de la estructura (Binda & Saisi, 2005). Específicamente en el caso de la mampostería, resulta fundamental analizar los métodos constructivos empleados, la composición de los elementos y las propiedades mecánicas involucradas. Este enfoque permitirá un examen minucioso de la estructura y una evaluación más completa de su integridad y comportamiento a lo largo del tiempo.

Una vez que se ha recopilado esta información, es posible proceder con el modelado de la estructura. El modelado estructural implica crear un sistema idealizado que ayuda a comprender y predecir el comportamiento dinámico de las estructuras. Este proceso implica una alta complejidad debido a múltiples factores, incluyendo las vinculaciones entre elementos estructurales y no estructurales, la geometría de la estructura, la rigidez de las divisiones presentes y los requisitos específicos de la edificación (Lourenço et al., 2011). En otras palabras, el modelado estructural es un enfoque que permite simplificar la realidad de una estructura en un sistema analítico que conserva sus características esenciales. La complejidad del modelo depende de varios elementos interconectados, y su precisión está directamente relacionada con la precisión y exhaustividad de la información recopilada previamente. El objetivo principal es capturar y representar adecuadamente el comportamiento de la estructura para realizar análisis posteriores y participar en el proceso decisorio informado sobre su conservación y posible intervención.

Las estructuras históricas tienen tipologías estructurales cuya complejidad geométrica es difícil de representar, como elementos de mampostería de modelado y establecer apropiadamente las propiedades mecánicas de los materiales para lograr los resultados deseados, como podemos representar en la Figura 2.1. Esta tarea no es tan sencilla porque la mampostería es un material heterogéneo.

Figura 2. 1

Complejidad del Modelado de un Puente en Arco



Nota: a) El puente Tre Ponti en Camachio-Italia. b) Modelado 3D c) Parche de tension normal vertical. d) Linea de empuje en el arco sobre el canal Pallota

Fuente: Pizzolato, 2010

En esta sección se presenta las bases teóricas las técnicas de evaluación no destructivas, además, de las estrategias de modelado numérico (MN) de estructuras y la calibración de las mismas.

2.2.2. Técnicas no destructivas

Las técnicas no destructivas empleadas en el OMA desempeñan un papel fundamental en la obtención de información precisa y detallada sobre las propiedades dinámicas de las estructuras. Estas técnicas permiten comprender cómo se comportan ante cargas dinámicas y

facilitan el diseño de estrategias para mitigar vibraciones y evaluar la integridad estructural.

Cuando se aborda el estudio de un monumento histórico construido con mampostería, se deben considerar diversos factores, como su comportamiento anisótropo, sensibilidad a la distribución de las cargas y heterogeneidad. Representar su geometría y caracterizar sus propiedades mecánicas puede ser desafiante pero esencial para crear un modelo adecuado (Asteris et al., 2019). En este contexto, Hum-Hartley (1978) fue uno de los pioneros al proponer enfoques no destructivos para la evaluación de construcciones patrimoniales, ya que la conservación del patrimonio busca minimizar las perturbaciones durante las intervenciones.

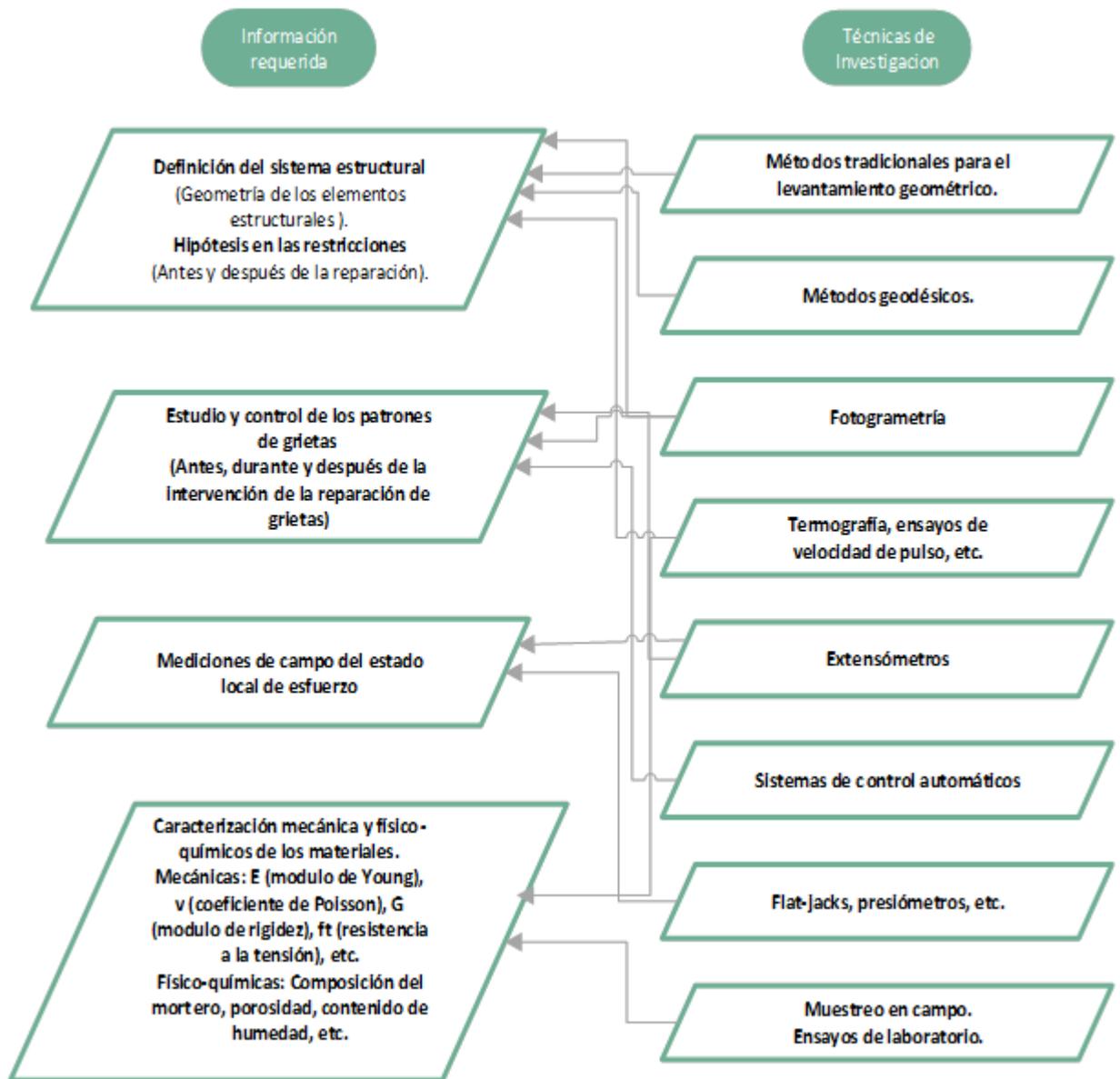
En la actualidad, las técnicas para evaluar deben contribuir en la metodología establecida por ICOMOS (2004), que prioriza la autenticidad y el valor cultural de las construcciones históricas. Este enfoque incluye la recopilación de datos, la evaluación de la integridad estructural, el diagnóstico y la implementación de medidas de seguridad e intervención.

La información obtenida está estrechamente relacionada con el estudio histórico, la caracterización del sistema estructural y su estado actual, así como la identificación de los materiales. Múltiples evaluaciones, tanto in situ como en laboratorio, de la caracterización mecánica de estructuras históricas de mampostería han sido presentadas por Binda et al. (2000). Estas evaluaciones se relacionan con los procedimientos de evaluación estructural, como se ilustra en la Figura 2.2. Este enfoque tiene como fin que se analicen las particularidades de las edificaciones históricas mediante diversas herramientas y métodos, lo que contribuye a comprender mejor su estado, historia y valor patrimonial.

Es imprescindible destacar que el avance de la tecnología ha dado lugar al desarrollo de herramientas que facilitan la evaluación de las particularidades de las edificaciones históricas, permitiendo revelar su geometría, evaluar su estado actual, detectar cambios y caracterizar sus propiedades dinámicas.

Figura 2. 2

Procedimientos de Evaluación Estructural



Nota: Información dada para evaluar estructuralmente y las técnicas para investigar que correspondan.

Fuente: Binda et al., 2000

2.2.2.1. Inspección de Obra

La inspección viene a ser el análisis arquitectónico y estructural de un edificio, en este caso es la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana, cuya finalidad es la de recabar información sobre el estado de conservación de la estructura en general. Existen

dos tipos de inspección según Aguilar R. (2020), una de ellas es la inspección visual, esta técnica consiste en que se identifiquen los caracteres arquitectónicos del monumento histórico y una observación detallada y sistemática de la estructura, fachadas, elementos arquitectónicos, materiales y otros aspectos relevantes permitiendo identificar daños, deterioro, cambios no autorizados, características originales y otros elementos que ayudan a comprender el estado y la autenticidad de la construcción, el otro consiste en una exploración detallada cuya finalidad es la de identificar los materiales utilizados para su ejecución, el sistema estructural con el que fue construido y por ultimo las patologías existentes en las estructuras. Al respecto Cancino et.al (2012) considera como métodos de inspección: las fichas de inspección estructural que documentan las condiciones en la que se encuentra la edificación y su configuración estructural visualmente, así mismo considera como otro método de inspección el uso de los métodos no destructivos, entre ellos la termografía como se observa en la Figura 2.3 (a-b) y 2.4(a-b-c-d) y finalmente el método de la inspección por realización de calas de prospección en puntos específicos del edificio, lo que permite descubrir los estratos que lo conforman.

Figura 2. 3

Patologías del Templo Compañía de Jesús



(a)



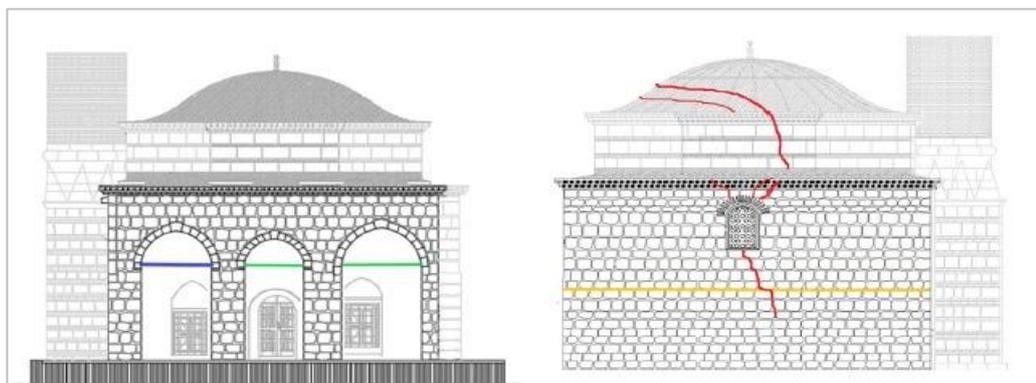
(b)

Nota: a) Inspección visual del templo Compañía de Jesús. b) Termografías infrarrojas del templo Compañía de Jesús

Fuente: Oré y Suárez, 2021

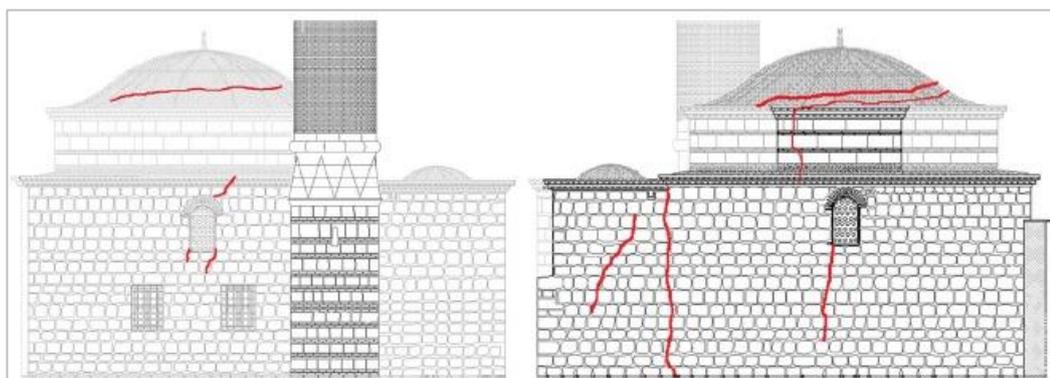
Figura 2. 4

Patologías del Templo Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey



(a)

(b)



(c)

(d)

Nota: a) Elevación norte b) Elevación sur c) Elevación este d) Elevación oeste

Fuente: Aşıkoğlu, 2019

2.2.2.2. Levantamiento geométrico y técnicas de reconstrucción

De acuerdo a Reategui Arrue (2022), la representación física - geométrica de una edificación patrimonial se viene realizando a través del tiempo con el fin de documentar la información semántica de la estructura sea en bocetos, planos o modelos paramétricos, este tipo de herramientas se han ido mejorando en el tiempo, inicialmente, para identificar las medidas se usaban partes del cuerpo humano como medio de referencia como los cánones o la secuencia matemática de Fibonacci, hoy en día se utilizan equipos más avanzados y de alta precisión.

Actualmente, el modelamiento en 3D según Arce et. al (2016) se ha convertido en un método importante para el registro de información tangible como intangible de la estructura, es una herramienta fundamental para aplicarla en el registro y mapeo de patologías en el campo de la conservación, realidad virtual y análisis estructural de los monumentos históricos, dicha información puede ser parametrizada mediante información gráfica y semántica para describir el modelo. Según los instrumentos, existen 4 técnicas para el levantamiento 3D de los Monumentos:

- Técnicas topográficas
- Técnicas empíricas
- Fotogrametría
- Técnicas de escaneo laser

Entre las técnicas más empleadas para la recopilación de información geométrica de los edificios sobresalen el escaneo laser y la fotogrametría (Pavlidis, 2007).

a) Escaneo laser

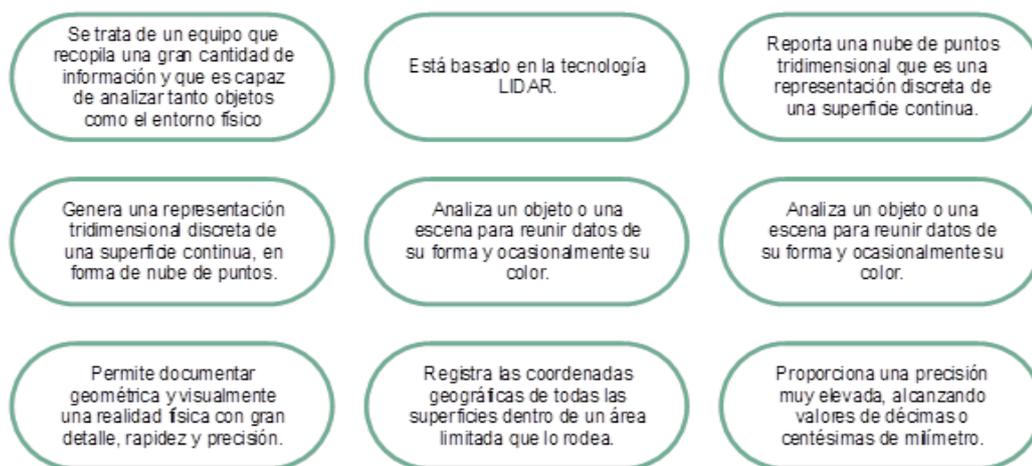
El escaneo laser también llamado TLS así como se establece en inglés, es una técnica para obtener la geometría espacial de un objeto o superficie de forma rápida y precisa utilizando la detección de luz para calcular distancias entre los instrumentos y el objeto (Gordon y Toth, 2018). Proporciona un modelo rápido y preciso para estructuras de gran tamaño y es utilizada permanentemente en

la digitalización de edificios patrimoniales, pero, destaca ciertas limitaciones como la recopilación de información fuera del rango de alcance en la visión como por ejemplo los elementos del techo.

Usar este método suele ser tedioso; a pesar de ello, su utilidad en el escaneo de elementos arquitectónicos, patrimonio cultural o fachadas de edificios, muestra la conveniencia de esta técnica (Riveiro et al., 2016). Las características generales de esta técnica la representamos en la Figura 2.4.

Figura 2. 5

Características Generales del Escáner



Fuente: Sinchi & Cobos, 2023

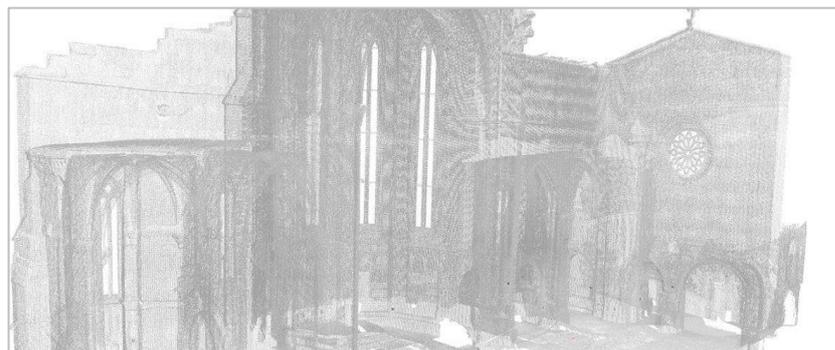
Se considera la aplicación de tecnología para adquirir y procesar datos en la construcción de modelos tridimensionales de edificios y patrimonio cultural. La adquisición de datos implica la colocación estratégica de un escáner láser para medir las distancias y ángulos de desviación en las superficies de una estructura u objeto. Este escáner gira a alta velocidad, registrando una cantidad considerable de datos que se unen para formar una nube de puntos. Luego, estas mediciones se combinan en un único sistema de referencia, lo que resulta en una nube de puntos que representa toda la estructura (Gordon y Toth, 2018). En la etapa de procesar datos, se generan modelos digitales en 2D y modelos volumétricos en 3D utilizando la información de la nube de puntos (Lubowiecka et al., 2019). En primer lugar, se eliminan los puntos de la nube que no afectan la forma del modelo, como ruido, dificultades externas o datos redundantes. Con la nube de puntos recopilada, se procede a crear un modelo digital de superficie utilizando técnicas como la triangulación. Este

modelo puede ser refinado en la fase de post procesamiento, por ejemplo, utilizando imágenes o texturas para generar modelos de superficie fotorrealistas. El resultado puede incluir geometrías precisas y ortofotos (Riveiro et al., 2016). A partir de estos productos, es probable que se generen archivos digitales, planos detallados de edificios históricos, visualizaciones para realidad virtual y realidad aumentada, entre otras aplicaciones. Esta tecnología permite capturar y representar de manera precisa la forma y detalles de estructuras históricas, facilitando su documentación, conservación y análisis en entornos virtuales.

La técnica del escaneo láser tiene diversas aplicaciones relacionadas con la documentación arquitectónica y la detección de problemas estructurales. Armesto (2020) utilizó esta técnica para analizar la situación actual de las ruinas de Santo Domingo en Pontevedra (ver Figura 2.5). El escaneo láser ha demostrado ser valioso para identificar y caracterizar patologías superficiales en muros de mampostería. En lo que respecta al control de construcciones, Laefer et al. (2010) emplearon un escáner láser para recopilar datos que fueron acopiados y luego, utilizados para que se detecte automáticamente las grietas en las fachadas de las edificaciones. Otra aplicación es centrarse en estructuras traza, que analizan las ventajas de aplicar es escaneo laser en el seguimiento de estructuras y proponen un modelo en el que es posible capturar las variaciones y desplazamientos de estructuras transformando las coordenadas en un sistema de coordenadas estructural (Lercari, 2019) desarrollando un método de seguimiento de estructuras aplicado a sitios arqueológicos para cuantificar su deterioro que lleva esta.

Figura 2. 6

Escaneo Laser 3D en Pontevedra



Nota: Ruinas de Santo Domingo

Fuente: Ingeniería insitu, 2020

b) Fotogrametría

La fotogrametría en construcciones patrimoniales es una valiosa herramienta que proporciona una representación precisa y detallada de las edificaciones históricas. Ayuda en la documentación, la conservación y la investigación de estos importantes testimonios culturales, facilitando la planificación y toma de decisiones informadas en su preservación.

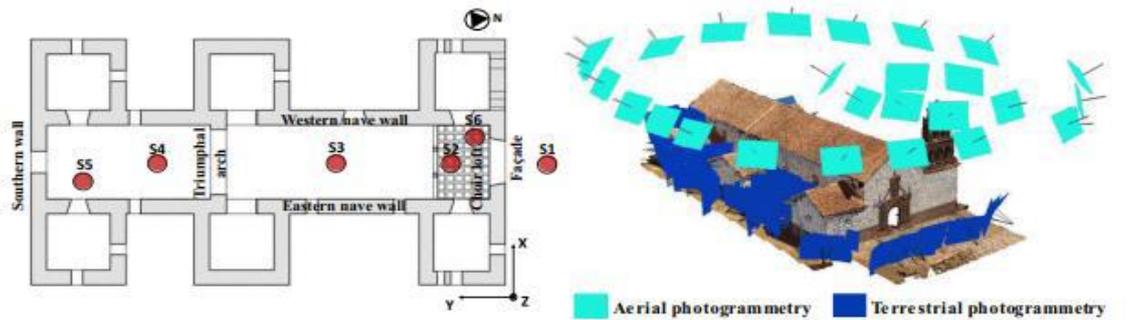
Asimismo, es una técnica de adquisición de datos pasiva que se utiliza en la creación de modelos 3D basados en imágenes. Esto implica la utilización de algoritmos de correlación que detectan puntos coincidentes en imágenes que representan un mismo objeto. Estas imágenes pueden ser capturadas a través de sistemas terrestres, satelitales o aéreos, dependiendo del alcance de la aplicación. Al igual que el escaneo láser, esta técnica se emplea en diversos campos como la cartografía, la preservación del patrimonio cultural, la ingeniería inversa, el monitoreo de cambios estructurales, la planificación urbana, la navegación y la comunicación de información (Remondino, 2021).

Desde otra perspectiva, la fotogrametría proporciona información rápida a bajo costo, con la seguridad de obtener información de lugares elevados, a diferencia del escaneo láser, sin embargo, la generación de modelos con fotogrametría requiere de una metodología bien organizada y aplicada.

Una herramienta para procesar en la nube densa de puntos es el Structure for Motion que es un algoritmo desarrollado por estudios de Koenderink & Van Doorn (1991) a partir del traslape y alineamiento de fotografías que llegan a tener áreas en común. El modelado 3D está definida por fases, la primera etapa contempla la adquisición de fotografías, la segunda el alineamiento de imágenes, la tercera etapa la generación de nube densa, la cuarta la generación de la malla 3d y por último el texturizado de la Malla. Para un correcto alineamiento, Jordan (2017) describe en su tesis que las imágenes deben presentarse con un traslape del 30%, y recomienda captar imágenes lo más consecutivo posible teniendo puntos de referencia. Esta técnica no es tan exacta a la hora del texturizado motivo por el cual se requiere una mayor nitidez a la hora de toma de fotografías, utilizando estos datos, se realiza un proceso de texturización adicional que asigna una variedad de colores y texturas basados en las fotografías originales.

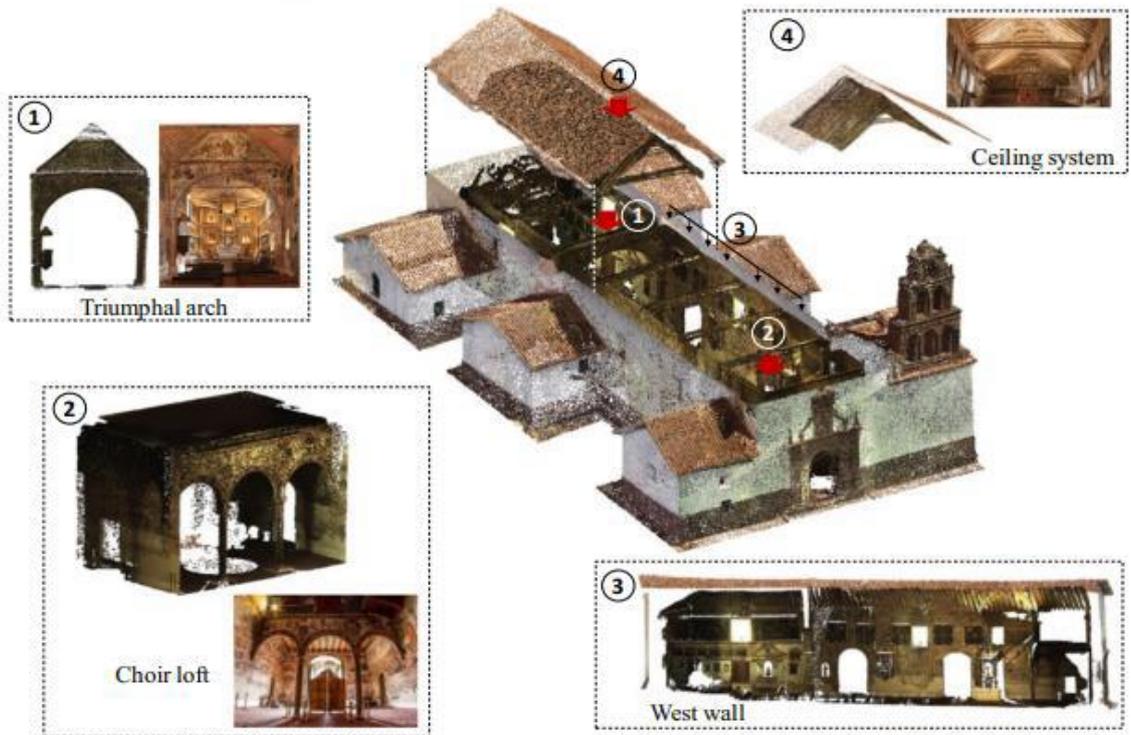
Figura 2.7

Proceso de Adquisición Geométrica en la Iglesia de Huaro



(a)

(b)



(c)

Nota: (a) Vista en planta de los puntos de escaneo laser, (b) Plan de Vuelo del Dron y (c) Resultante de la nube densa

Fuente: Aguilar et. Al, 2019

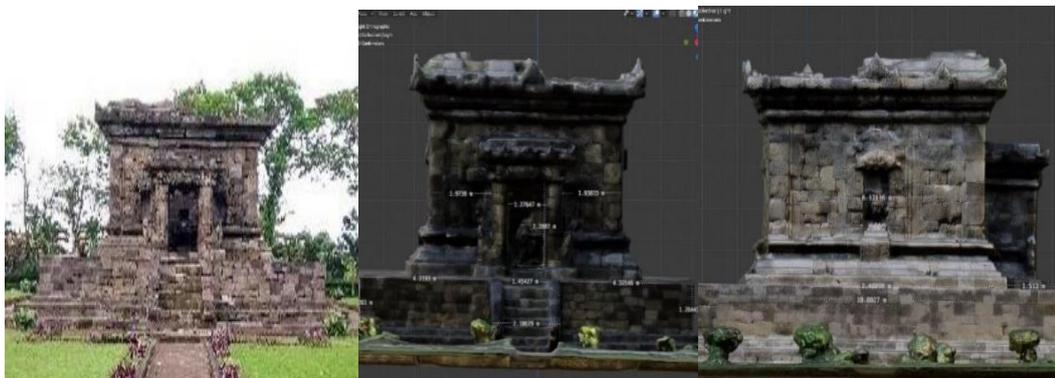
Igualmente, la fotogrametría ofrece diversas ventajas en la creación de modelos 3D. En contraste con el escaneo láser, la fotogrametría puede funcionar con equipos más asequibles y de mayor capacidad. Además, su accesibilidad no representa un problema, gracias a avances como la fotografía con drones. Algunas de las cualidades de esta técnica incluyen su facilidad de uso y su bajo costo. Por ejemplo, Kamin et al. (2017) presentaron un método

que emplea vehículos aéreos no tripulados (UAVs) para inspeccionar visualmente monumentos históricos y detectar patologías en la estructura externa de un museo. Esta evaluación permitió identificar diversas anomalías y demostró la utilidad de los UAVs en tareas de conservación y restauración. Además, Shults (2017) expuso el uso de teléfonos inteligentes como herramienta de bajo costo para aplicar la fotogrametría en edificios históricos, obteniendo resultados satisfactorios mediante verificaciones de precisión.

Ambos métodos mencionados anteriormente destacan sus ventajas y limitaciones. Por ejemplo, la fotogrametría puede proporcionar detalles de alta calidad con un presupuesto limitado y espacio de procesamiento reducido, aunque no logra ofrecer una textura de alta resolución. Por ello, Yastikli (2017) concluyó que tanto la fotogrametría como el escaneo láser son enfoques adecuados para la documentación de construcciones patrimoniales. Además, la automatización ha mejorado significativamente para lograr resultados precisos. Combinar ambas técnicas también resulta útil para asignar colores a los puntos escaneados, crear mallas, texturas y ortoimágenes. Por su parte, Tolle et al. (2022) introdujeron un procedimiento basado en pruebas diversas, como la fotogrametría y las pruebas de identificación modal, para perfeccionar la construcción de MN. Esto permite detectar daños y realizar seguimientos de componentes estructurales. Este estudio concluyó que este tipo de enfoque es efectivo para identificar grietas, movimientos y que generen modelos de EM, lo que se puede verificar en la Figura 2.8.

Figura 2. 8

Aplicación de la Técnica de Fotogrametría



Nota: Desarrollo de objetos de templo 3D basado en el método de fotogrametría, Templo Badut-Indonesia

Fuente: Tolle et al., 2022

2.2.3. Ensayos de Identificación Modal

Constituyen una herramienta valiosa para la determinación de los parámetros dinámicos de las estructuras (Compan et al., 2017) midiendo un parámetro variable en el tiempo (desplazamiento, velocidad o aceleración). Estas pruebas se han utilizado en ingeniería civil desde la década de 1980 como medio de calibración numérica de modelos, detección de defectos y para controlar la calidad. Se cuenta con tres metodologías para ejecutar los ensayos experimentales:

- Análisis Modal Experimental (EMA)
- Análisis Modal Operacional (OMA)
- Análisis Modal Operacional con Exogenous (OMAX)

El primer enfoque, llamado **Análisis Modal Experimental** (EMA), se basa en la excitación controlada del sistema mediante fuentes de energía, como golpes, impactos o vibraciones, y la medición de las respuestas del sistema en términos de desplazamientos, velocidades o aceleraciones. Estas mediciones se realizan utilizando sensores, como acelerómetros o sensores de desplazamiento, que registran las vibraciones del sistema en diferentes puntos. Por medio de la vinculación entre la entrada aplicada y la salida observada, es factible deducir los parámetros modales. Desde las primeras implementaciones prácticas hasta la actualidad, ha habido una notable evolución tanto en los dispositivos de prueba como en los algoritmos utilizados para que se procesen datos. Por lo tanto, EMA es en la actualidad, un campo bien establecido basado en sólidas bases teóricas documentadas en libros de referencia (Ewins 2000; Heylen et al. 2013; Mendes y Montalvão, 1997) y ampliamente utilizado en la práctica, por ejemplo, en las industrias aeroespacial y automotriz (varias las aplicaciones están documentadas en las actas de la Conferencia Internacional de Análisis Modal-IMAC, una conferencia anual organizada desde 1982).

Utilizando los datos de vibración registrados, se realiza un análisis con el propósito de establecer las frecuencias naturales, configuraciones modales y coeficientes de

amortiguación del sistema. Estos parámetros modales proporcionan información valiosa sobre la respuesta dinámica del sistema y su comportamiento estructural.

Las técnicas EMA también se pueden adoptar para la identificación de parámetros modales estructuras de ingeniería civil, tales sean los puentes, presas o edificios. Pero, su gran tamaño impone desafíos adicionales. En específico, la aplicación de una excitación dinámica controlada y medible requiere el uso de aparatos muy pesados y caros (Cunha & Caetano, 2006). A pesar de la complicada logística, estas Pruebas de Vibración Forzada ya se han realizado con éxito en presas masivas o en puentes (Figura 2.9).

Figura 2. 9

Pruebas de Vibración Forzada



Nota: a) vibrador servo-hidráulico utilizado por EMA para excitar una presa en dirección horizontal. b) Vibradores utilizados en el puente atirantada de Tátara en Japón

Fuente: Cunha & Caetano,2006

En el segundo enfoque, llamado **Análisis Modal Operacional (OMA)**, en el caso de estructuras de ingeniería civil, son mucho más práctico y económico, ya que las fuertes sacudidas son reemplazadas por fuerzas ambientales libremente disponibles, como el viento o el tráfico que circula sobre o cerca de la estructura. Como consecuencia las Pruebas de Vibración Ambiental, tiene una ventaja relevante de permitir la evaluación dinámica de importantes infraestructuras civiles, como puentes,

sin perturbar su normal funcionamiento. Además, como las estructuras se caracterizan mediante condiciones reales de operación, en caso de existir comportamiento no lineal, los resultados obtenidos son asociados con niveles realistas de vibración y no con vibraciones generadas artificialmente, ya que es el caso cuando se utilizan pruebas de vibración forzada.

Además de esto, las Pruebas de Vibración Ambiental tiene dos desventajas adicionales en comparación con las Pruebas de Vibración Forzada: la masa modal no se estima (o las formas modales no se escalan de forma absoluta) y la frecuencia, el contenido de la excitación puede no cubrir toda la banda de frecuencia de interés, especialmente cuando es muy rígido.

Recientemente, técnicas de prueba modales combinadas, llamadas **Análisis Modal Operacional con eXogenous** (OMAX), han sido exploradas. En este tipo de ensayo dinámico se utiliza una fuerza artificial en condiciones operacionales. La principal diferencia entre OMAX y EMA es que las fuerzas operativas se incluyen en el modelo de sistema identificado en lugar de asumirse como ruido. De esta manera, la amplitud de la fuerza artificial aplicada puede ser del mismo nivel o incluso menor que la siempre presente excitación ambiental. Como consecuencia, se pueden adoptar dispositivos de excitación relativamente pequeños. Los dispositivos de excitación que podrían considerarse como "relativamente pequeños" en el contexto de la vibración estructural podrían ser transductores piezoeléctricos, actuadores electromagnéticos compactos o incluso dispositivos magnetostrictivos. Estos pueden ser empleados para aplicar una fuerza artificial durante pruebas de vibración y análisis modal en estructuras.

En antecedentes teóricos de este enfoque, así como los detalles de su aplicación a la ingeniería civil, describe Reyners (2009) que los algoritmos OMAX puede ser útil para procesar datos recopilados en Pruebas de Vibración Forzada utilizando agitadores o para procesar datos recopilados en pasarelas donde la excitación ambiental se complementó con una excitación artificial producida por un pequeño

dispositivo de excitación (por ejemplo, martillo de impacto), así como se puede verificar en la Figura 2.10.

Figura 2. 10

Actuadores Utilizados para la Prueba Modal Combinada



(a)

(b)

(c)

Nota: a) Un sistema de caída de peso. b) Un martillo de impacto). c) Un neumático músculo artificial

Fuente: Reyners, 2009

El uso de ensayos experimentales no destructivos para evaluar la respuesta de los monumentos históricos es un aspecto clave de la conservación, seguimiento o diagnóstico de dichos edificios. Estos ensayos de identificación modal nos permiten establecer las propiedades dinámicas de la estructura (amortiguamiento, frecuencias naturales y los modos de vibración), como se describe en (Aguilar R. , 2020), y también pueden integrarse en sistemas de monitoreo continuo para caracterizar cambios dinámicos, y detectar daños con el tiempo. Asimismo, (Aguilar et al, 2019) demostraron que la aplicación de pruebas de identificación modal en la evaluación de estructuras históricas se basa en conceptos fundamentales de la dinámica estructural.

Por otro lado, los conceptos de dinámica estructural son aspectos clave en la conservación, seguimiento y diagnóstico de estructuras históricas patrimoniales, ya que permite evaluar la respuesta

global de estos edificios gracias a métodos experimentales que se basan en la medición de vibraciones.

La investigación sobre vibraciones, que probablemente se hizo famosa en el siglo VI a. C., como Pitágoras [572-512] a través de experimentos sobre la vibración de cuerdas, y más tarde como Galileo [en 1564-1642], Newton [en 1643-1727], Euler [en 1707-1783], Lagrange [en 1736-1813], Rayleigh [en 1842-1972], Timoshenko [en 1878-1972] y Jacob Pierter Den Hartog [en 1901-1989]. Como menciona Boroschek (2015), tienen que pasar por un gran número de experimentos; pruebas entre las cuales las técnicas más utilizadas son los ensayos de Pull Back, los ensayos de vibración forzada y los ensayos de excitación ambiental, también muestra que la aplicabilidad de un ensayo a otro depende de ciertas condiciones, como se muestra.

- Condiciones de construcción.
- Usando la estructura.
- Disponibilidad de dispositivos de excitación y registro.
- Términos que desea conocer.
- El costo del ensayo.

2.2.4. Análisis de vibraciones con métodos experimentales

2.2.4.1. Análisis de Vibraciones mediante Excitaciones Forzadas

Este tipo de pruebas instalan maquinaria en una estructura para generar vibraciones con frecuencias y fuerzas conocidas. Para estos dispositivos de excitación (Figura 2.11), consisten en masas excéntricas que giran en direcciones opuestas o se mueven con masa variable en una dirección en la estructura usando gatos hidráulicos (Boroscheck, 2015). Este tipo de máquina oscila a una frecuencia conocida, y se determina el desplazamiento máximo para luego

determinar la respuesta máxima en función de la frecuencia de excitación. Este tipo de análisis requiere entradas conocidas(input), que se aplican al sistema para registrar las salidas correspondientes(outputs). La respuesta FRF (Función de Respuesta de Frecuencia) se obtiene de las funciones de entrada y salida, con las cuales se pueden estimar las propiedades dinámicas de la estructura (Cunha & Caetano, 2006).

Figura 2. 11

Dispositivos de Excitación



Nota: Vibradores servo-hidráulico para excitación vertical

Fuente: COTECNO, 2023

2.2.4.2. Análisis de Vibraciones con Excitación Ambiental

Este tipo de ensayo es el más económico y coloca en la estructura una serie de sensores que registran aceleraciones, velocidades o movimientos obtenidos a partir de los estímulos ambientales a los que la estructura está expuesta cada día (vientos, movimiento de personas o vehículos, micro vibraciones, etc.), como la prueba de identificación modal operativa (OMA), que permite detectar las particularidades dinámicas de la estructura, es un tipo de análisis donde las entradas no se conocen porque la excitación es causada por oscilaciones ambientales (Cunha & Caetano, 2006). De igual forma (Chacara , 2013)

menciona este tipo de técnica donde los estímulos ambientales son tratados como un proceso estocástico estático de ruido blanco gaussiano que sintoniza estructuras en el intervalo de frecuencia de interés.

La naturaleza de los datos recopilados por las pruebas de identificación modal de las respuestas estructurales incluye los efectos de la vibración ambiental y las señales (ruido) de fuentes no deseadas. Por lo tanto, se deben utilizar técnicas para procesar datos para separarlos, las técnicas utilizadas se clasifican en dos grupos según el campo, puede ser en función del tiempo o la frecuencia, como en la Tabla 2.1 se detallan los métodos empleados en los diferentes análisis (Caetano , 2000).

Tabla 2. 1

Método de Solo Salida

Método	
Dominio de Frecuencia	Dominio de Tiempo
Recolección de picos	Decremento aleatorio
Descomposición del dominio de frecuencia	Métodos de máxima verosimilitud
Descomposición de dominio de frecuencia mejorada	Métodos de identificación del subespacio estocástico
Polimax	Técnicas recursivas

Fuente: Caetano, 2000

2.2.4.3. Sistema de Medición de Ensayos Experimentales de Identificación Modal

Dichos ensayos se llevan a cabo al medir parámetros en la estructura que experimentan cambios a lo largo del tiempo. Estos parámetros pueden incluir desplazamiento, aceleración y velocidad en puntos específicos de la estructura. Los sistemas de adquisición de datos por cable son las pruebas experimentales más utilizadas para el reconocimiento modal. El sistema consta de transductores de medida o transductores conectados a un ordenador portátil. En la prueba de campo, el

transductor convierte la cantidad mecánica parametrada por el movimiento en una señal eléctrica y transmite la información derivada a la computadora (Figura 2.12).

Figura 2. 12

Sistema de Monitoreo Dinámico de Estructuras



Fuente: Aguilar, 2010

Los sensores juegan un papel crucial en el registro de respuestas estructurales. Se pueden utilizar diferentes sensores como sismógrafos, velocímetros y acelerómetros para que se registre la respuesta de las estructuras patrimoniales. En el contexto de estructuras, es crucial destacar que, para una medición efectiva de los parámetros dinámicos, los sensores deben ser colocados en lugares de la estructura donde se produzcan desplazamientos notables en las formas modales. Shimpi et al. (2019) mencionaron que la ubicación efectiva del sensor se puede determinar en función del juicio del ingeniero, la experiencia pasada, el modelo numérico inicial y el análisis modal, el algoritmo de optimización y una mezcla de los parámetros anteriores.

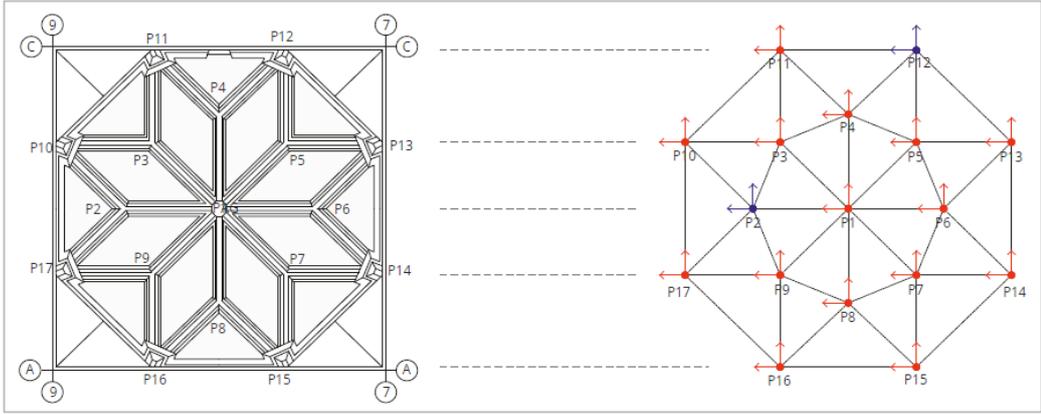
En el caso de edificios históricos, varios estudios han demostrado que es difícil colocar acelerómetros donde se necesitan debido a limitaciones como la geometría compleja o la inaccesibilidad. Turek et al. (2015) mencionaron que debido a trabajos de restauración algunas partes de la torre no pudieron ser accedidas y probadas y tuvieron que colocar los acelerómetros cerca del área restringida. Por otro lado, en los estudios de Diaferio & Giannoccaro (2015) presentaron irregularidades del piso, motivo por el que fue difícil colocar los acelerómetros

en la posición ortogonal de la torre en estudio. Para realizar la prueba diseñaron un bloque rectangular que permita colocar los acelerómetros de forma ortogonal.

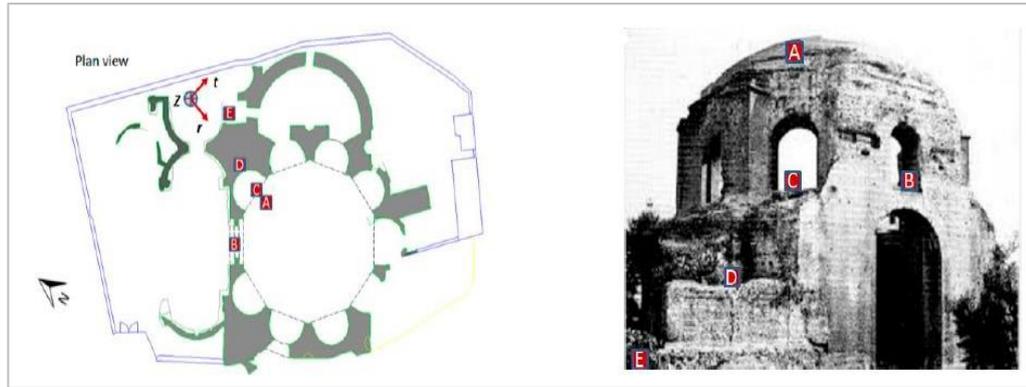
El número de sensores utilizado variará del modelo que se esté construyendo y de la cantidad de modos de vibración que se deseen investigar. Para ilustrar esto, consideremos un estudio que involucra pruebas de vibración ambiental en el techo de la Catedral de los Catorce Santos en Alemania. Dado que la catedral presenta diversas características únicas y un alto nivel de complejidad geométrica, se denotó la necesidad de una configuración especial para la medición. En este caso específico, se optó por utilizar 276 puntos de medición distribuidos en los 3 ejes primordiales (longitudinal, transversal y vertical) del techo. Esta configuración incluía una malla densa de sensores, con el propósito de capturar de manera precisa los modos de vibración global de la bóveda. La Figura 2.13 muestra visualmente cómo se dispusieron estos sensores en el techo de la catedral.

Esta selección cuidadosa del número y la distribución de los sensores es crucial para asegurar una recopilación de datos precisa y representativa, permitiendo obtener información valiosa acerca del comportamiento dinámico de la estructura en estudio.

Figura 2. 13
Pruebas de Vibración Ambiental



(a)



(b)

(c)

Nota: a) Gráfico para ubicar los acelerómetros en el intradós de la capilla de Jura, en rojo los acelerómetros móviles y los azules los acelerómetros fijos, b) Vista en planta del monumento con posiciones de instrumentos, Templo de Minerva Médica. c) Puntos de medida en la fachada principal, Templo de Minerva Médica

Fuente: Roselli et al., 2018

En el análisis de estructuras históricas, los acelerómetros más empleados son los piezoeléctricos y los de equilibrio de fuerza. Los acelerómetros piezoeléctricos aprovechan las propiedades de sus cristales internos, generando cargas eléctricas cuando se deforman, lo que se traduce en una señal eléctrica mensurable. En cambio, los acelerómetros de equilibrio de fuerza constan de una masa y un componente sensible que detecta su movimiento, convirtiéndolo en una señal eléctrica (Gentile et al., 2015).

En la identificación modal, los acelerómetros de equilibrio de fuerza tienen un beneficio sobre la mayor parte de los piezoeléctricos al poder establecer una medición de frecuencias naturales de vibración muy bajas con alta sensibilidad. Esto los hace especialmente útiles para capturar las vibraciones de baja frecuencia características de construcciones históricas y edificios antiguos.

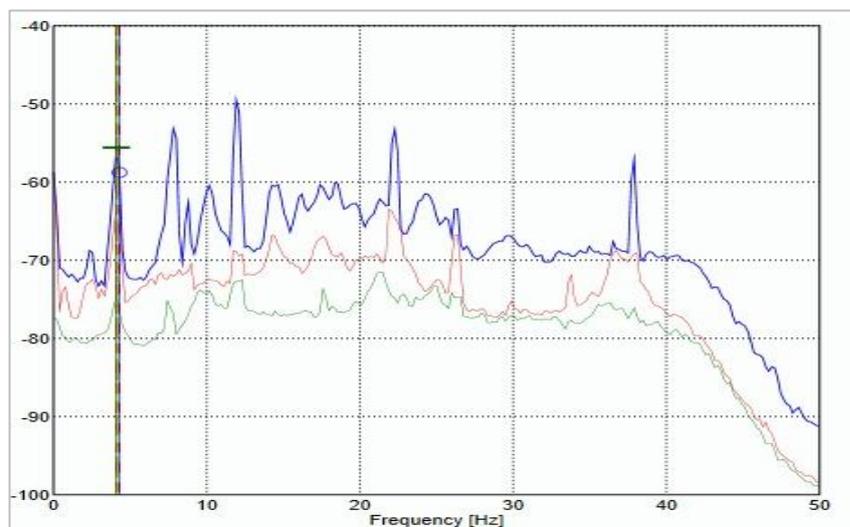
2.2.5. Métodos de Procesamiento de Datos

2.2.5.1. Selección de Picos

El método de Peak Picking es un método sencillo y conveniente que estima las frecuencias resonantes clasificando los picos más altos de la media normalizada de las acciones espectrales (Braun et al., 2001). Para poder conseguir estas funciones se utiliza la prueba que se encargará de convertir las señales de la influencia del tiempo en la influencia de las frecuencias y se encargará de estimar la densidad espectral por el resultado se visualizará los picos correspondientes a las frecuencias naturales de la configuración como se verifica en la Figura 2.14.

Figura 2. 14

Método de Peak Picking



Nota: Función de densidad espectral

Elaborado por: las autoras

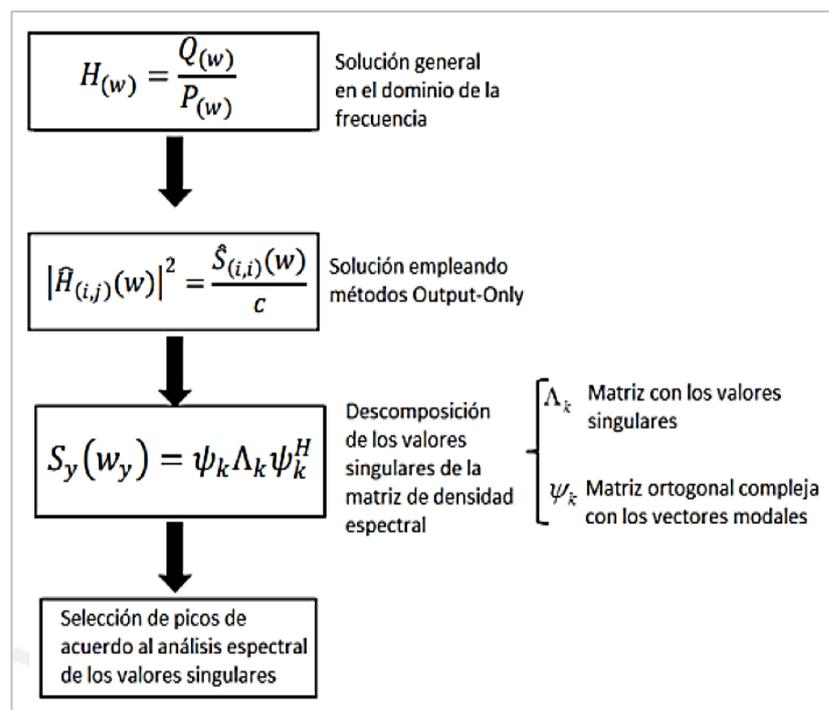
2.2.5.2. Descomposicion de Dominios de Frecuencias (FDD)

La FDD se considera como un método avanzado no paramétrico que supera ciertas limitaciones del método Peak-Picking en el análisis de señales. En este enfoque, la señal se descompone en sus componentes de frecuencia utilizando la transformada de Fourier, lo que facilita su análisis y caracterización en el dominio de la frecuencia.

El FDD implica descomponer la matriz de funciones de densidad espectral en valores y vectores utilizando un algoritmo de descomposición de valores singulares. Esto tiene como resultados gráficos más claros y con menos ruido (Brincker et al., 2001). En este proceso, se utilizan los valores y vectores singulares para extraer la autocorrelación de las funciones de densidad espectral de un grado de libertad específico. La Figura 2.15 muestra el progreso de este algoritmo en acción.

Figura 2. 15

Algoritmo de FDD



Nota: Algoritmo empleado en el método de descomposición de dominio de frecuencias

Fuente: Aguilar, 2010

2.2.5.3. Método de Descomposición mejorada en el Dominio de Frecuencia (EFDD)

Es un método mejorado donde se emplea la transformada inversa de Fourier para llevar la función de densidad

espectral al dominio del tiempo. Esto resulta en la obtención de una función de autocorrelación, y los coeficientes de frecuencia y amplitud son estimados mediante un decaimiento logarítmico (Brincker et al., 2001). Por otro lado, es importante destacar que la supresión es un parámetro delicado que se estima empleando una inspección experimental minuciosa. En este método se seleccionan los vértices del gráfico, y también las áreas en las que los respectivos vectores singulares tienen una alta correlación entre sí (Mendes, 2012).

2.2.5.4. Identificación de Subespacio Estocástico (SSI)

El concepto de Subespacio Estocástico (SSI) es utilizado en el campo de la teoría de control y la estimación de sistemas estocásticos. El SSI se refiere a un subespacio de un espacio de observación donde se encuentran las componentes principales de las señales estocásticas observadas. El objetivo del SSI es encontrar una representación de baja dimensión de las señales estocásticas que preserve la información relevante. Esto puede servir para estimar parámetros, la detección de anomalías o la predicción de eventos futuros.

El enfoque de Subespacios Estocásticos de identificación se caracteriza por su capacidad para considerar el efecto temporal y contribuir a una estimación precisa de las propiedades dinámicas con alta precisión. El método SSI se focaliza en la obtención de información esencial, representada por las matrices A y B como se puede detallar en la Figura 2.15, que incluyen datos relacionados con frecuencias, modos de vibración y coeficientes de amortiguación (Ramos 2007).

El modelo se puede identificar a partir de correlaciones (o covarianzas) de los resultados: Identificación subespacial estocástica impulsada por covarianza SSI-COV; o directamente de Datos de Identificación subespacial estocástica impulsada SSI-DATA. Como se informó en (Peeters, 2000), estos dos métodos están muy

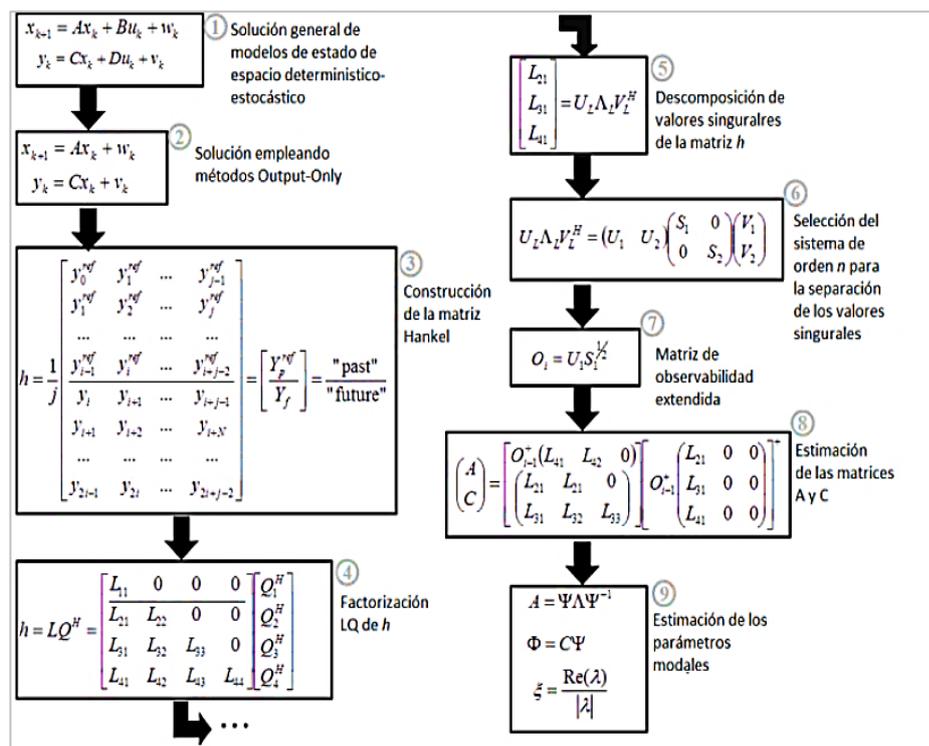
relacionados. Aun así, el SSI-COV tiene la ventaja de ser más rápido y basado en principios más simples, mientras que el SSI-DATA permite obtener más información con un posprocesamiento conveniente como, por ejemplo, la descomposición de la respuesta medida en modal contribuciones.

Es importante destacar que la identificación del SSI es un proceso que depende de los datos y requiere ciertas suposiciones sobre la naturaleza de las señales estocásticas. Además, existen varias técnicas y enfoques para la identificación del SSI, por lo que es recomendable consultar la literatura especializada para obtener más detalles y ejemplos específicos.

Los resultados del método de frecuencias de identificación de subespacio estocástico se representan en esquemas de estabilización que conlleva polos estables, polos inestables y por último el ruido. Podemos apreciarlo en la Figura 2.16, donde se estudió capilla del Jura en España antes y después de su restauración.

Figura 2. 16

Algoritmo del SSI

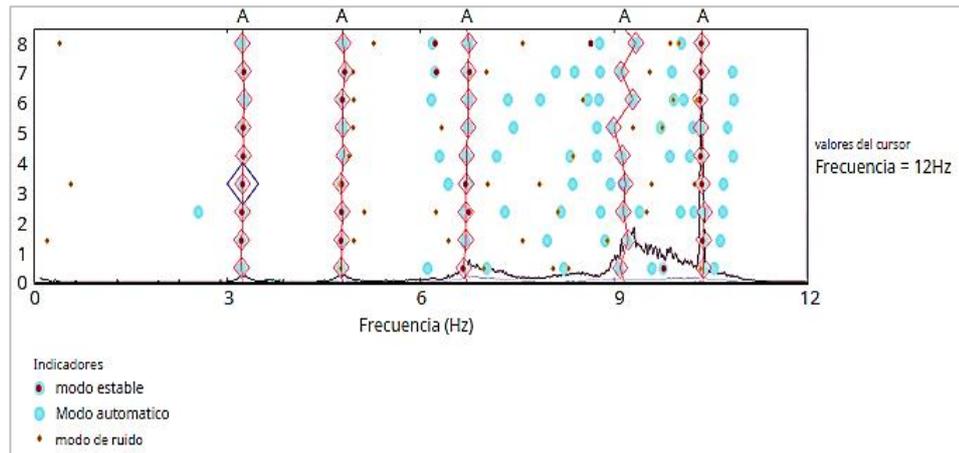


Nota: Algoritmo del método de Identificación de subespacio estocástico

Fuente: Aguilar et al., 2019

Figura 2. 17

Esquema de Estabilización del SSI



Nota: Prueba ambientales antes y después de la restauración de la capilla Jura

Fuente: Romero et al., 2018

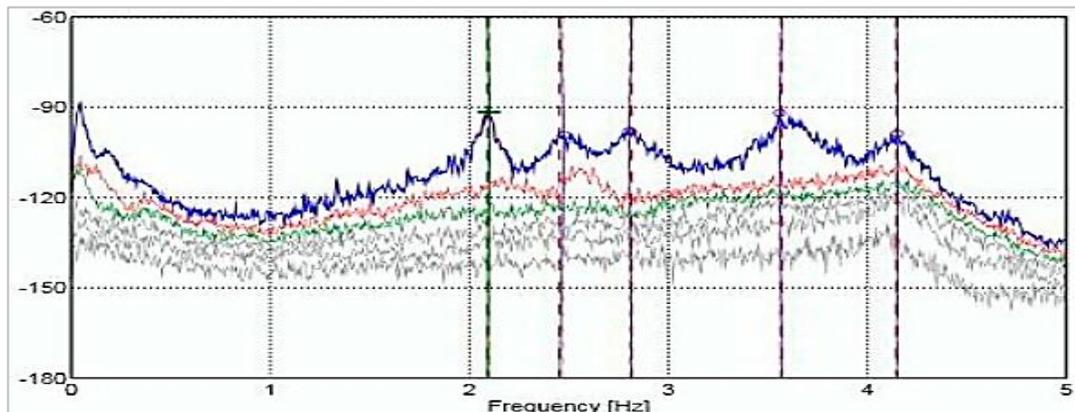
En los estudios de Zini et al. (2018), determinó que las técnicas detalladas (SSI, EFDD, FDD) se establecen en el análisis de grandes estructuras civiles porque pueden proporcionar un mayor grado de registro de caracteres y también detectar una mayor cantidad de propiedades dinámicas. Sin embargo, las señales grabadas en edificios patrimoniales suelen ser muy débiles debido al ruido significativo.

Con el fin de abordar las limitaciones asociadas a la adquisición de señales, los investigadores emplearon enfoques de selección de valores de frecuencia basados en datos empíricos para estimar las propiedades dinámicas de las estructuras. Presentándose así a, Aguilar et al. (2017) ejecutaron experimentos de OMA utilizando métodos de detección modal en dos dominios: el de la frecuencia (EFDD y FDD) y el del tiempo (SSI) en el Hotel Comercio. Los dos primeros métodos lograron detallar las dos primeras frecuencias naturales, por otro lado, el método SSI fue capaz de detectar hasta nueve frecuencias naturales. En una línea similar, utilizando una mezcla de los métodos de procesamiento SSI y EFDD, Roselli (2018) identificó modos de vibración en el Templo Minerva Medica en Roma. Para el EFDD (consultar Figura 2.18(a)), resultó desafiante escoger los valores de frecuencia de la curva de densidad

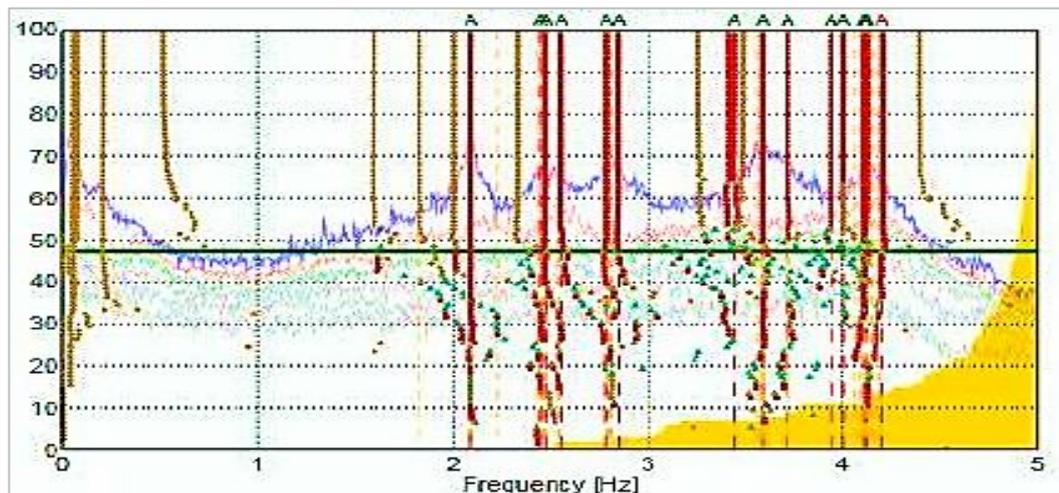
espectral debido a la presencia de múltiples picos de frecuencia. En consecuencia, se recurrió al método SSI (visualizar Figura 2.18(b)) adicionalmente, ya que los polos estables en el diagrama posibilitaron una identificación más precisa y eficiente de los modos de vibración más significativos.

Figura 2. 18

Gráficos de EFDD y SSI del Templo Minerva Medica.



(a)



(b)

Nota: a) Gráfico sobre densidad espectral del método EFDD. b) Diagrama de estabilización del método SSI

Nota: Roselli et al., 2018

2.2.6. Calibración del Modelo Numérico

La calibración de un modelo numérico se considera como un proceso por el cual se ajustan los parámetros del modelo

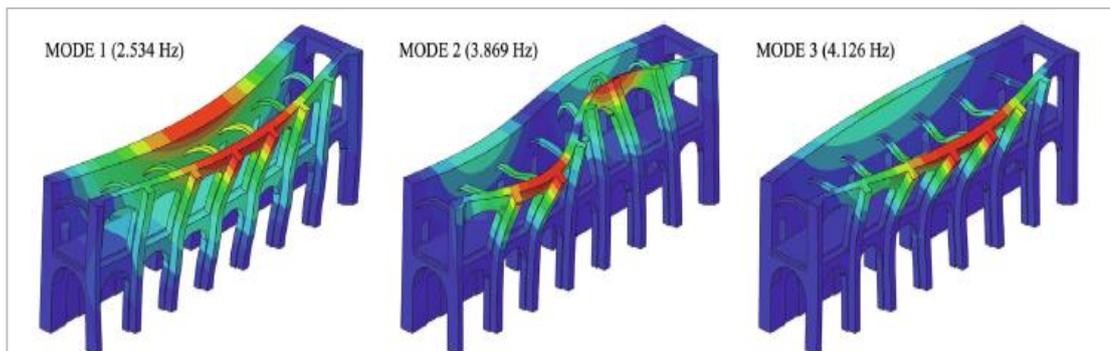
para que se ajusten mejor a los datos observados o a las condiciones del mundo real. Esto implica que se comparen los resultados del modelo con datos de referencia o mediciones reales y ajustar los parámetros del modelo para minimizar las discrepancias entre ellos.

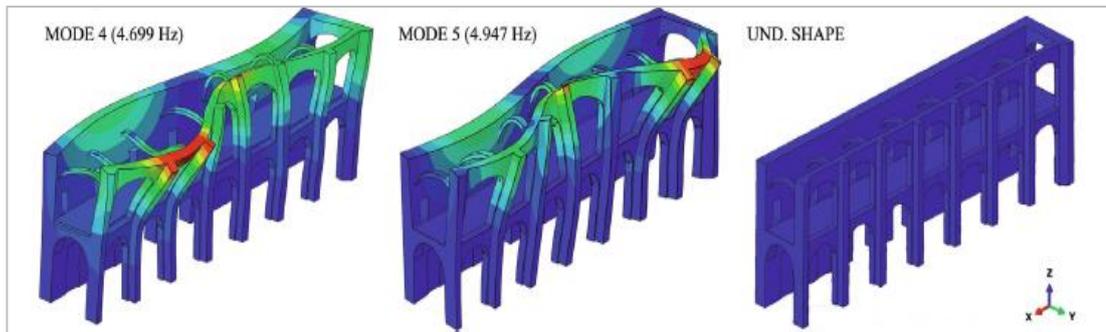
Asimismo, es un proceso iterativo y requiere conocimientos técnicos, experiencia en el dominio y un enfoque científico riguroso. Es importante tener en cuenta las limitaciones del modelo y los datos utilizados, así como realizar una validación adecuada para garantizar la confiabilidad y aplicabilidad del modelo calibrado.

Actualmente, disponemos de herramientas numéricas como son los EM, macro elementos, elementos discretos, entre otros, que nos permiten abordar el análisis de diseños paramétricos que representan estructuras reales. Sin embargo, es importante destacar que estos diseños no son infalibles, ya que se basan en suposiciones y aproximaciones que pueden no reflejar con precisión la realidad (Friswell et al., 2001). Además, para mejorar su confiabilidad, se recurre a la calibración de estos diseños, como se menciona, a través de una serie de técnicas de procesamiento que implican la modificación de los parámetros de entrada. Específicamente, las particularidades de los materiales y las condiciones de frontera, son ejemplos de parámetros que se ajustan con el objetivo de lograr que la simulación numérica reproduzca de manera efectiva el comportamiento estructural observado en los resultados de pruebas experimentales, tal como se puede notar en la Figura 2.19.

Figura 2. 19

Ensayos para Calibración de Modelos Numéricos





Nota: Uso de ensayos de identificación modal para calibración de modelos numéricos

Fuente: Pachón et al., 2019

Los criterios utilizados para calibrar MN se pueden dividir en dos grupos principales: en primer lugar, se encuentra la comparación de modos de vibración y frecuencias naturales. En esta categoría, se incluyen conceptos como la relación de modos (MAC), los modos normalizados (NMD), la relación entre modos y frecuencias naturales (FMAC), las coordenadas modales (COMAC y ECOMAC). En segundo lugar, tenemos el grupo de criterios basados en respuestas de frecuencias (FRAC). Para obtener más detalles sobre estos métodos, se puede hacer referencia a la explicación proporcionada por Aguilar et al. (2019).

El MAC se representa como un valor numérico que refleja la concordancia entre dos vectores modales, y se calcula según la Ecuación 2.1. En el contexto de este estudio de caso, el vector modal del método analítico se denota con el subíndice "exp", mientras que el vector modal del método experimental se denota con el subíndice "num". El valor del MAC varía entre 0 y 1; cuanto más se acerque el valor a 1, mayor será la similitud entre los vectores modales. Este análisis comparativo también es aplicable cuando se evalúan los resultados experimentales, lo que permite evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

$$MAC = \frac{|\{\varphi_{exp}\}^T \{\varphi_{num}\}|^2}{(\{\varphi_{exp}\}^T \{\varphi_{exp}\}) (\{\varphi_{num}\}^T \{\varphi_{num}\})}$$

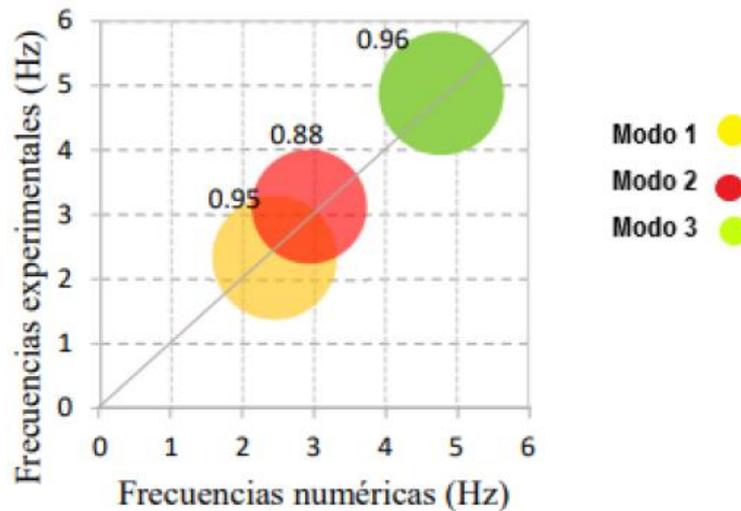
Ecuación 2.1

Además, el FMAC es un modelo utilizado para comparar los modos y las frecuencias naturales de vibración,

representado gráficamente en forma de diagramas (Figura 2.20). En este método, cada uno de los círculos en el diagrama se espera que esté cercano a la línea de tendencia, lo que indica una correlación entre las frecuencias. Mientras que, el tamaño de cada círculo en el diagrama refleja el MAC.

Figura 2. 20

Representación del FMAC



Nota: Representación de modos y frecuencias naturales.

Fuente: Aguilar et al., 2019

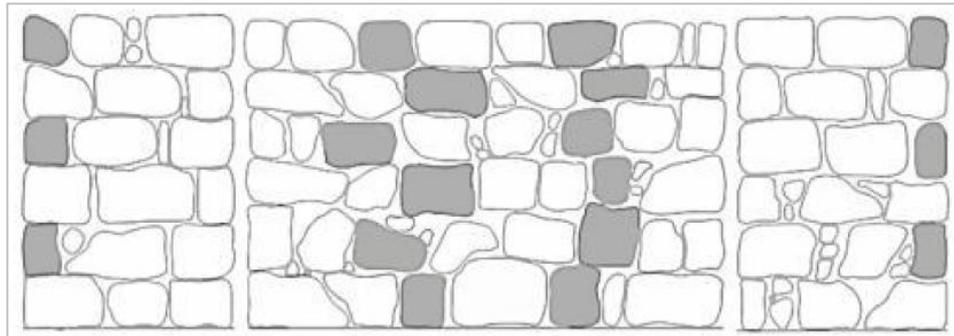
2.2.7. Propiedades mecánicas de la mampostería

2.2.7.1. Mampostería de piedra

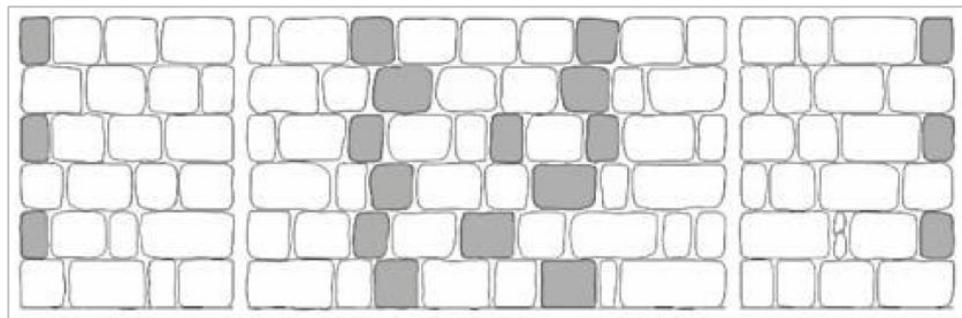
La mampostería se compone de bloques que pueden unirse mediante mortero o juntas secas. Estos bloques pueden estar hechos de piedra, arcilla o ladrillo, y el espacio entre ellos es llenado con mortero, una mezcla que suele contener cal, cemento, arena y agua. La mampostería se clasifica principalmente según cómo se apilen los bloques, como se ilustra en la Figura 2.21 (a), donde las piedras están dispuestas de manera irregular, y en la Figura 2.21(b), donde las piedras tienen un espaciamiento regular. En este tipo de estructuras, la interacción entre los materiales varía, lo que tiene un impacto directo en las particularidades mecánicas de la mampostería.

Figura 2. 21

Clasificación de la Mampostería de Piedra-Elevación



(a)



(b)

Nota: a) Construcción de mampostería irregular. b) Construcción de mampostería regular

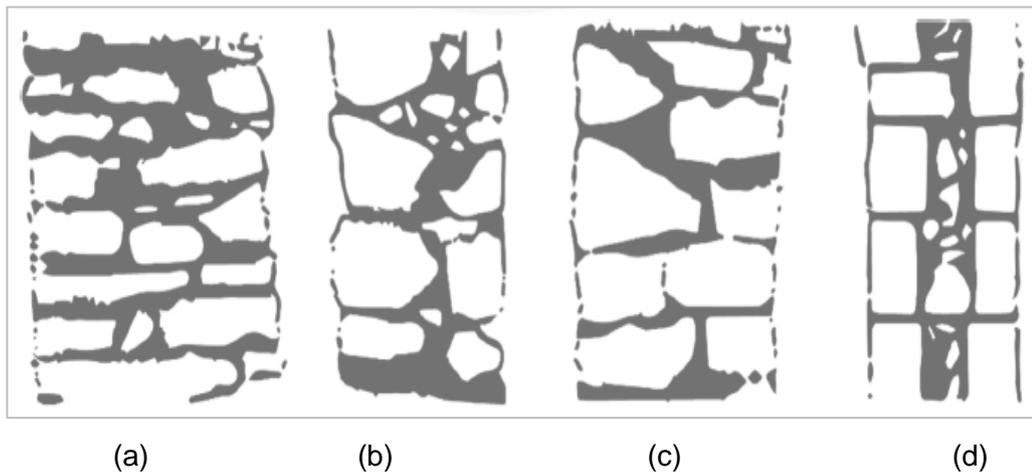
Nota: Maccarini et al., 2018

De manera similar, la apariencia exterior regular de la mampostería puede llevar a una clasificación superficial, sin tener en cuenta su composición interna. Binda et al. (2000) ejecutaron un estudio en torno a alrededor de 2000 estructuras de mampostería de piedra en diversas regiones de Italia, con el propósito de abordar trabajos de restauración que involucraban la inyección de mortero. Como resultado de su investigación, se logró una clasificación de la mampostería en función de sus secciones transversales. Esta clasificación se puede observar en la Figura 2.22a, donde los muros están sólidamente contruidos y se componen de capas individuales de relleno con pequeñas partículas agregadas. En contraste, en la Figura 2.22b, las hojas de mampostería están parcialmente unidas por capas de mortero, mientras que en la Figura 2.22c las hojas no

guardan relación entre sí debido a la superposición de las piedras. Finalmente, en la Figura 2.22d, los muros se clasifican como si tuvieran tres o más láminas exteriores regulares. Los investigadores sugirieron que los modelos numéricos de estos muros deberían tener en cuenta principios fundamentales que describen la fricción y cohesión entre las piezas y el mortero, con el fin de simular de manera más precisa su comportamiento.

Figura 2. 22

Clasificación de la mampostería de piedra-transversal



Nota: a) Dos hojas que se encuentran bien vinculadas. b) Dos hojas parcialmente vinculadas. c) Dos hojas sin vinculación. d) Tres o más hojas

Nota: Binda et al., 2000

La mampostería se comporta de manera frágil cuando está sometida a tensiones, lo que significa que fallará de manera repentina al alcanzar su capacidad máxima. Sin embargo, presenta una alta resistencia a la rigidez y compresión, valores que superan los del mortero. Este comportamiento es principalmente influenciado por las propiedades mecánicas de las juntas. Las fallas principales en la mampostería pueden ser causadas por movimientos debido a fuerzas de compresión, apertura debido a fuerzas de tracción y deslizamiento causado por fuerzas de corte (Quelhas et al., 2018). La mampostería es un material no continuo y anisotrópico, lo que significa que su comportamiento difiere de materiales compuestos modernos como el acero, hormigón armado o madera. Para entender su comportamiento, es necesario describir adecuadamente las propiedades mecánicas de cada unidad, el espesor de

las juntas y las dimensiones de los componentes (Quelhas et al., 2018). Estas características hacen que la mampostería sea altamente heterogénea y desafiante de caracterizar.

Es esencial comprender que la mampostería se caracteriza por ser un material discontinuo y anisotrópico, lo que significa que su comportamiento se diferencia significativamente de materiales compuestos modernos como el acero, el hormigón armado o la madera. Para obtener una comprensión adecuada de su comportamiento, es necesario describir minuciosamente las propiedades mecánicas de cada unidad individual, así como el grosor de las juntas y las dimensiones de los componentes que la constituyen (Quelhas et al., 2018). Estas particularidades hacen que la mampostería exhiba una alta heterogeneidad y presente desafíos considerables en su caracterización.

En el contexto de la evaluación estructural, entender las propiedades y el comportamiento de la mampostería es crucial para prever su respuesta ante cargas, vibraciones y otros factores que puedan afectar la integridad y la estabilidad de las construcciones históricas y patrimoniales. Por lo tanto, la caracterización detallada de la mampostería es esencial para llevar a cabo un análisis preciso y eficiente de la dinámica y la seguridad de las estructuras.

En el contexto de construcciones históricas, las particularidades mecánicas de los materiales a menudo se idealizan debido a la falta de información precisa sobre su composición interna. Esto lleva a tratar a la mampostería como un material homogéneo e isótropo, ello indica que, con características independientes de la ubicación y dirección analizada. Al idealizar las propiedades en el rango elástico lineal, los parámetros más importantes son el módulo de Young (E), la relación de Poisson (ν) y la densidad (ρ). Por ejemplo, Meli (1998) informó valores de módulo elástico de 0.50 GPa para mampostería irregular con alto contenido de mortero, mientras que en mampostería de piedra normal con juntas de mortero muy finas, los valores de elasticidad fueron de 19.60 GPa. Esto resalta la importancia del orden y disposición de las piedras en términos de la durabilidad global de la estructura.

Las propiedades mecánicas acorde a la literatura para diferentes mamposterías de edificios históricos se agrupan en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2

Propiedades mecánicas de mampostería de piedra

Propiedades mecánicas lineales de la mampostería						
Referencias	Piedra irregular			Piedra regular		
	E (Gpa)	v	p (Kg/m3)	E (Gpa)	v	p (Kg/m3)
Meli (1998)	0.49	-	2000	19.6	-	2000
NTC (2008)	1.02	-	1900	1.5	-	2100
Milani et al., (2014)	-	-	-	-	-	-
Ramírez et al., (2016)	-	-	-	1.9	0.2	2100
Angjeliu et al. (2019)				2	0.2	2000

Nota: Particularidades mecánicas lineales de la mampostería de piedra irregular y regular (Adaptados a distintos autores).

2.2.7.2. Mampostería de adobe

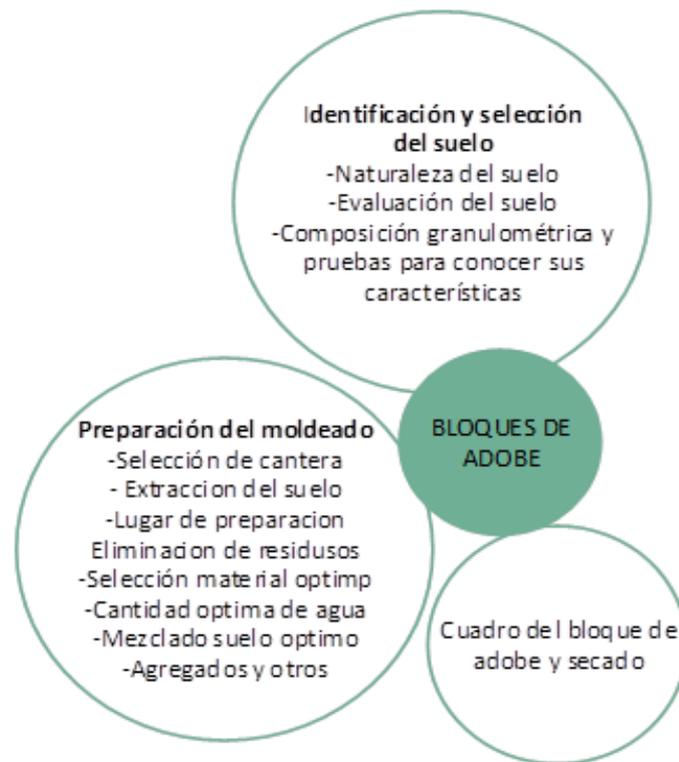
Se refiere a un método de construcción que utiliza ladrillos hechos de barro crudo, arena y otros materiales orgánicos. Estos ladrillos de adobe se moldean y se secan al sol antes de usarse para construir paredes. La técnica de albañilería de adobe se ha utilizado desde la antigüedad y se encuentra en varias partes del mundo, especialmente en regiones con climas secos y cálidos.

El método de construcción conocido como muros en adobe se basa en el ensamblaje de unidades de tierra cruda secadas al sol, llamadas adobes, unidas con barro como mortero. Estas unidades básicas pueden ser fabricadas o moldeadas en diferentes formatos y con diversas características granulométricas (Rivera, 2012). El esquema de fabricación del adobe ilustrado en la Figura 2.23 representa las acciones continuas y repetitivas necesarias para producir las unidades de construcción, tanto en adobes históricos como modernos. A pesar del

transcurso del tiempo, la técnica constructiva en sí no ha experimentado cambios significativos. No obstante, ha habido avances y mejoras en la composición de los adobes, con la incorporación de elementos tanto inorgánicos como orgánicos a través de métodos químicos, físico-químicos. Estos enfoques tienen como finalidad la mejora de las propiedades mecánicas y el comportamiento de los adobes ante condiciones externas, en particular la exposición al clima, a la que estas estructuras suelen estar ampliamente expuestas (Rivera, 2012). La siguiente figura muestra todas las variables involucradas en este proceso, las cuales pueden variar de un edificio a otro.

Figura 2. 23

Diagrama del proceso de fabricación de adobe



Nota: Fases de la fabricación de adobe, unidad básica de la mampostería

Nota: Rivera, 2012

La mampostería de adobe es una técnica constructiva tradicional utilizada en la construcción de edificaciones patrimoniales y vernáculas en muchas partes del mundo. Consiste en la colocación de ladrillos hechos de barro crudo o arcilla mezclada con otros

materiales naturales, como paja, fibras vegetales o estiércol, que luego se secan al sol o se cuecen al fuego para endurecerlos.

En este tipo de construcciones, las unidades de adobe se unen entre sí con mortero de barro o arcilla, formando paredes macizas o muros. La técnica de construcción de la mampostería de adobe ha sido utilizada durante siglos debido a su disponibilidad de materiales y a su eficiencia térmica, ya que los adobes tienen propiedades aislantes que ayudan a mantener una temperatura estable en el interior de las viviendas.

Las construcciones patrimoniales que utilizan la mampostería de adobe suelen tener características arquitectónicas y estilísticas propias de cada región o cultura. Estas estructuras pueden presentar detalles ornamentales, como molduras, frisos o relieves, que reflejan la artesanía y el estilo de la época en la que fueron construidas.

Sin embargo, la mampostería de adobe también tiene algunas limitaciones y requerimientos de mantenimiento específicos. Las construcciones de adobe resultan ser más susceptibles a daños causados por la humedad, la erosión y los terremotos, por lo que resulta imprescindible que se implemente técnicas de conservación y restauración adecuadas para preservar estas construcciones patrimoniales.

Por consiguiente, la mampostería de adobe es una técnica constructiva tradicional utilizada en construcciones patrimoniales, que consiste en la colocación de ladrillos de barro crudo o arcilla unidos con mortero de la misma composición. Estas edificaciones reflejan la cultura, historia y el patrimonio de una región, y demandan de cuidados específicos para su conservación a lo largo del tiempo.

2.3. Definición de Términos Básicos

Análisis Modal operacional: Se emplea en el área de la ingeniería estructural con el propósito de identificar las propiedades modales de una estructura en funcionamiento, se basa en las respuestas

obtenidas de manera no intrusiva durante la operación real de la estructura (RAMIRO , 2018).

El OMA se utiliza para obtener información sobre los modos de vibración, las formas modales y frecuencias naturales de una estructura. Esto es especialmente útil en el monitoreo de estructuras existentes, ya que permite evaluar su estado de salud, detectar daños o cambios en las propiedades estructurales a lo largo del tiempo (RAMIRO , 2018).

La información obtenida mediante el OMA es de gran valor para la evaluación del estado de la estructura en términos de integridad y seguridad. La identificación de cambios en las frecuencias naturales, amplitudes de vibración y formas modales a lo largo del tiempo puede indicar posibles deterioros, daños o incluso cambios no autorizados en la estructura. Esto es particularmente útil en estructuras patrimoniales o de importancia histórica, donde se busca preservar su integridad a lo largo de los años.

Además, el OMA permite realizar comparaciones, lo que mejora la validación y ajuste de los modelos matemáticos utilizados para el análisis estructural. Si los resultados experimentales y numéricos concuerdan de manera significativa, se refuerza la confianza en la capacidad del modelo para representar con precisión el comportamiento real de la estructura.

Parámetros modales dinámicos: Según los estudios realizados por Magalhães et al., (2009). Definen a los parámetros modales dinámicos como una medida utilizada en el campo de la dinámica estructural para caracterizar el comportamiento vibratorio de un sistema. Estos parámetros describen las características modales de un sistema, que incluyen la frecuencia natural, la forma modal y el amortiguamiento.

- La frecuencia natural viene a ser la frecuencia a la cual un sistema vibrará en ausencia de fuerzas externas. Viene a ser una propiedad intrínseca del sistema y varía de las propiedades físicas y geométricas

de la estructura. Cada modo modal tiene una frecuencia natural asociada.

- La forma modal se refiere a la forma en que vibra un sistema en un modo modal específico. Está determinada por la distribución de los desplazamientos y deformaciones en la estructura durante la vibración. Cada modo modal tiene su propia forma modal característica.
- El amortiguamiento es una medida de la pérdida de energía durante la vibración de un sistema. Puede ser causado por la disipación de energía debido a la fricción interna, la radiación de energía en forma de ondas sonoras u otros mecanismos de disipación. El amortiguamiento afecta la amplitud y la duración de las vibraciones.

Al estudiar los parámetros modales dinámicos de un sistema, es posible comprender mejor su respuesta vibracional y su comportamiento bajo cargas dinámicas. Estos parámetros son ampliamente utilizados en el análisis estructural, el diseño de sistemas de control vibratorio y la evaluación del rendimiento de estructuras sometidas a vibraciones, como puentes, edificios, vehículos y máquinas.

Modelo numérico: Un MN de cálculo estructural es una representación matemática y computacional de una estructura que permite analizar y predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga. Estos modelos se basan en principios y leyes de la mecánica estructural y utilizan métodos numéricos para resolver ecuaciones y obtener soluciones aproximadas (Saouma, 2014).

Existen diferentes tipos de modelos numéricos utilizados en el cálculo estructural, entre los más comunes se encuentran:

- Modelos de EM: Este método divide la estructura en elementos más pequeños y discretos, como triángulos o tetraedros en geometría tridimensional, y se aplica la teoría de EM para resolver las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento estructural. Cada elemento se caracteriza por sus propiedades materiales, geometría y

condiciones de frontera, y se ensamblan para formar un sistema global de ecuaciones (Saouma, 2014).

- Modelos de elementos discretos: Estos modelos se utilizan para simular el comportamiento de estructuras compuestas por partículas o elementos discretos interconectados. Cada partícula se modela individualmente y se tienen en cuenta las interacciones entre ellas, como las fuerzas de contacto, las fuerzas de fricción y las fuerzas de cohesión (Saouma, 2014).
- Modelos de análisis matricial: Estos modelos utilizan la teoría de matrices para representar y resolver el comportamiento estructural. Las estructuras se representan mediante matrices de rigidez y se utilizan métodos de análisis matricial, como el método de la rigidez directa o el método de la matriz de transferencia, para resolver las ecuaciones y obtener las respuestas estructurales (Saouma, 2014).

Estos modelos numéricos permiten simular el comportamiento de las estructuras en condiciones estáticas y dinámicas, analizar la distribución de esfuerzos y deformaciones, evaluar la estabilidad y resistencia estructural, y realizar estudios de optimización y diseño. Sin embargo, es importante destacar que estos modelos son aproximaciones y requieren validación experimental para garantizar su precisión y confiabilidad.

ARTEMIS Modal Pro: Es un software especializado en el análisis modal y el detalle de parámetros modales en estructuras. Es desarrollado por la empresa SVIBS, y se emplea mucho en la industria de la ingeniería civil y la dinámica estructural (Sinus Messtechnik GmbH, 2023).

ARTEMIS Modal Pro permite realizar análisis modal a partir de datos de vibración medidos en una estructura, con el objetivo de obtener información sobre las frecuencias naturales, formas modales y amortiguamiento de la estructura. Estas características modales son fundamentales para comprender y evaluar las propiedades dinámicas de

una estructura y son utilizadas en el diseño, la evaluación de la integridad estructural y el monitoreo de la salud estructural.

El software utiliza métodos avanzados de procesamiento de señales y técnicas de identificación modal para extraer los parámetros modales de los datos de vibración medidos. Puede trabajar con diferentes tipos de datos de entrada, como respuestas de acelerómetros, respuestas de sensores de deformación o respuestas de sensores de presión (Sinus Messtechnik GmbH, 2023).

Semejanza modal MAC: (Modal Assurance Criterion) En los estudios realizados por Aguilar et al, (2019) utiliza el coeficiente de semejanza modal MAC para cuantificar la similitud entre dos modos de vibración o estructuras, y se calcula mediante la comparación de los vectores modales de ambas estructuras. Los vectores modales contienen información sobre la distribución de las deformaciones en cada modo de vibración.

El coeficiente de semejanza modal MAC se encuentra definido como el grado de superposición entre dos vectores modales, y varía entre 0 y 1. Un valor de 1 indica una semejanza modal perfecta, lo que significa que los dos modos de vibración son idénticos o muy similares. Un valor cercano a 0 indica una baja similitud entre los modos de vibración.

El cálculo exacto del coeficiente de semejanza modal MAC en estructuras puede variar dependiendo del método utilizado para obtener los vectores modales, como el método de EM o el análisis experimental de modalidades. Sin embargo, el concepto básico es comparar y cuantificar la superposición entre los vectores modales de las estructuras en estudio.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis General

HG: Aplicando el Análisis Modal Operacional se conocerá las propiedades dinámicas de vibración para la conservación de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana en la ciudad de Cusco.

2.4.2. Hipótesis Específicos

HE1: El levantamiento geométrico permitirá realizar el modelo de elementos finitos de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.

HE2: La Propiedades modales de vibración determinará un modelo fiable de elementos finitos de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.

HE3: La calibración el modelo numérico permitirá ajustar los parámetros modales de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Diseño Metodológico

Luego de haber planteado el problema, describir el marco teórico, reconociendo los antecedentes internacionales y nacionales que sirven de soporte para el objeto de estudio; el paso que sigue a continuación consistió en establecer la metodología a ser empleado en la investigación, detallando el enfoque de estudio a seguir, el tipo, el nivel y por último el diseño de investigación adecuados para que se logren los objetivos trazados.

Según Tamayo & Tamayo (2004) es un enfoque habitual para alcanzar con precisión el propósito de la investigación, ya que nos proporciona los métodos y técnicas necesarios para llevar a cabo el estudio de manera efectiva.

Con respecto al diseño metodológico, se reconoce como un componente crítico y fundamental, ya que proporciona el marco necesario para analizar y comprender los resultados obtenidos en relación con la problemática específica que se investiga, considerando tanto la naturaleza del problema en cuestión como los diseños teóricos establecidos para su abordaje.

3.1.1. Enfoque de Investigación

Hernández et al. (2014) “emplea la recopilación de información con el propósito de poner a prueba suposiciones mediante la utilización de mediciones numéricas y el análisis estadístico. Este proceso tiene como objetivo identificar tendencias de comportamiento y validar teorías” (pag 4), asimismo para Borja (2016), “Sugiere que una vía confiable para comprender la realidad consiste en recopilar y examinar datos. Esto permitiría abordar las cuestiones planteadas en la investigación y poner a prueba las hipótesis formuladas” (pag 11).

Teniendo en cuenta algunas definiciones del tipo de enfoque, el estudio fue **Cuantitativo**, debido a que se obtuvo resultados numéricos para contrastar los objetivos de la investigación realizada y poder dar soluciones al problema.

3.1.2. Tipo de Investigación

Según Valderrama (2013) es considerada investigación aplicada o también llamada activa, práctica o empírica cuando se encuentra ligada profundamente a la investigación elemental, ya que varía conforme a sus aportes teóricos para que se ejecute la solución de problemas planteados, con el objetivo de crear bienestar a la Sociedad (pág. 164).

Teniendo esta base el tipo fue **Aplicada** debido a que se emplea teorías y conocimientos, tan solo se pone a prueba su utilización.

3.1.3. Nivel de Investigación

Para Palella y Martins (2012) “el nivel explicativo se basa en determinar los principios o las procedencias de un conjunto de fenómenos complicados y delicados, en los que el riesgo de tener errores es alto”, por lo que concluimos que el nivel es **explicativo** por que la investigación se enfoca en establecer el origen o la causa de los sucesos o fenómenos que se detallan.

3.1.4. Diseño de Investigación

De acuerdo a Hernández et al (2014) el segundo requisito para un diseño experimental radica en la medición del efecto que el constructo independiente tiene sobre la dependiente mediante una relación causa-efecto, donde la medición debe ser confiable, válida y adecuada. Así la presente investigación es de diseño **experimental**.

3.2. Diseño Muestral

3.2.1. Población

También llamado el universo es el total de Edificios patrimoniales de la ciudad de Cusco, en especial el Cusco es una de las ciudades que exhiben un gran número de edificios patrimoniales que presenta un valor arquitectónico e histórico que según el Ministerio de Cultura son 57. Dentro de ellos se considera en el departamento Cusco 57 templos monumentales.

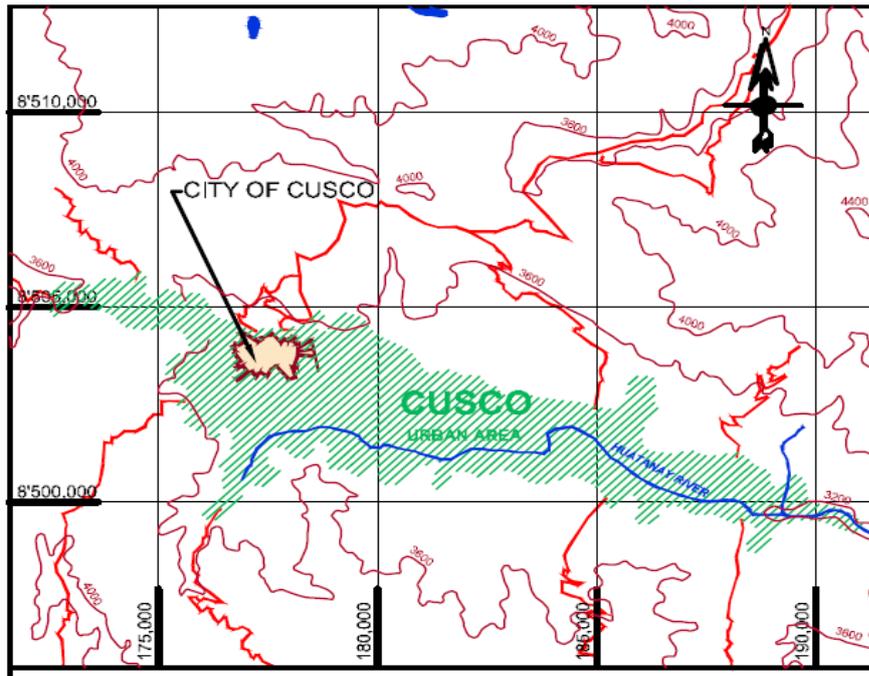
La ciudad de Cusco, fundada por el Inca Manco Cápac, se convirtió en el principal centro urbano del Imperio del Tahuantinsuyo. Contaba con palacios, templos, patios, calles y plazas rodeadas de amplias áreas agrícolas y artesanales. Durante el siglo XV, con su gobernante, el Inca Pachacútec, alcanzó su máximo desarrollo.

Después de la conquista española del Imperio Inca en 1534, la ciudad fue construida sobre los recintos y edificios incas existentes. Cusco ha sido reconocida como patrimonio cultural debido a su valor excepcional a nivel mundial, ya que representa una obra maestra del ingenio artístico humano. Por lo tanto, la ciudad cumple con cuatro criterios importantes:

CRITERIO (I): Es un testimonio único del reino del Tahuantinsuyo, que ejerció control político, religioso y administrativo sobre varias regiones del sur de América durante los siglos XV y XVI (Figura 3.1).

Figura 3. 1

Plano de la Ciudad de Cusco dentro del Reino Tahuantinsuyo



Fuente: Ministerio de cultura, 2023

CRITERIO (II): La ciudad del Cusco encapsula 3000 años de desarrollo cultural autóctono en los Andes del sur de Perú.

CRITERIO (III): Es un ejemplo representativo de la fusión de dos culturas distintas: la convergencia de los incas y los españoles, que generó un destacado sincretismo cultural y dio forma a una estructura urbana y una arquitectura únicas, proporcionando un testimonio singular de los logros arquitectónicos de las comunidades culturales.

CRITERIO (III): La ciudad de Cusco conserva la organización regional y gran parte de las edificaciones de la antigua capital del Imperio Inca y el Virreinato.

A pesar del crecimiento de la ciudad, los sectores que componen la ciudad imperial de los Incas son reconocibles por sus antiguas construcciones de piedra y técnicas de construcción, que delinear las calles y patios donde se ubicaban casas, monasterios e iglesias

coloniales y republicanas. Estos elementos arquitectónicos y obras de arte se conservan intactos. La ciudad de Cusco ha sido declarada como patrimonio cultural de la nación mediante el Decreto N° 2900 del año 1972. Según esta normativa, todas las calles del área designada se consideran parte del entorno urbano monumental, y se catalogan 103 edificios como monumentos históricos. El Ministerio de Cultura y la Municipalidad Provincial de Cusco son los principales encargados de proteger y preservar los edificios patrimoniales, y llevan a cabo una evaluación constante de la planificación urbana, el registro, la protección, la inspección y el control. La municipalidad de Cusco es responsable de aprobar las modificaciones en la ciudad y participar en programas y proyectos para conservar y restaurar el patrimonio cultural.

3.2.2. Muestra

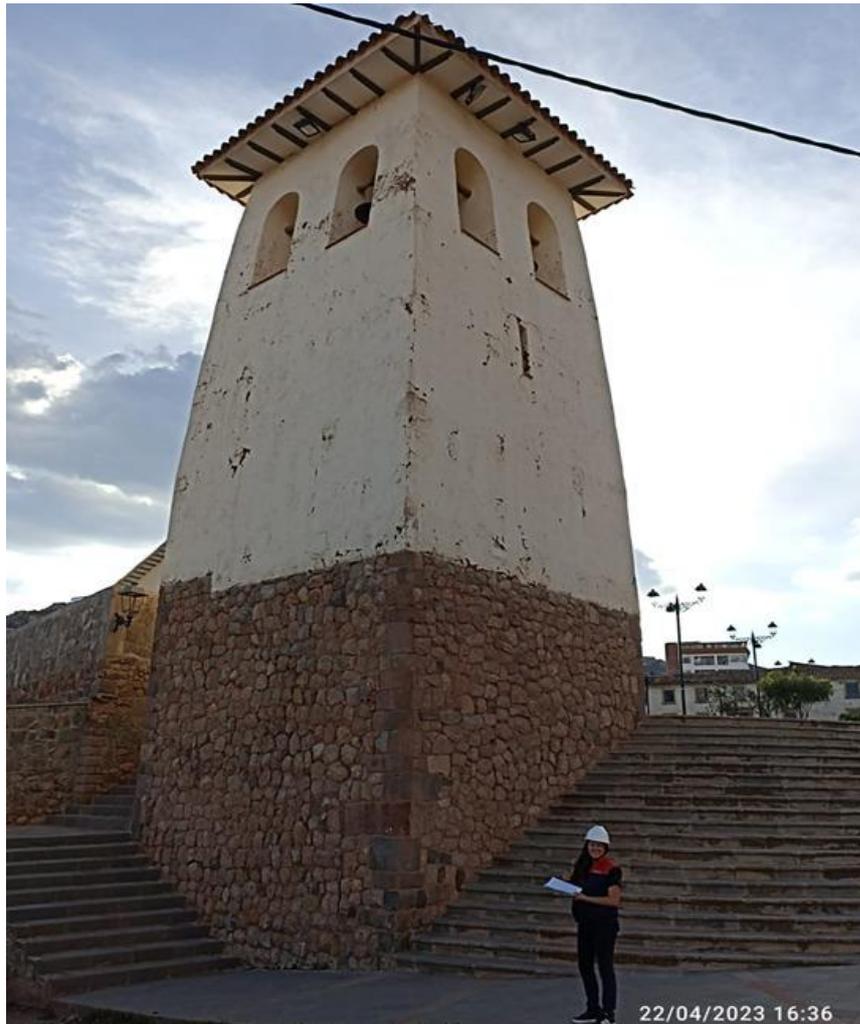
Es una proporción de la población detallada de la cual se hace los estudios y se recaba datos para ejecución del estudio.

La muestra de esta investigación es la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana que está compuesta por un sobrecimiento hecho con mampostería de piedra y cal, y el cuerpo construido con mampostería de adobe.

La torre exenta confiere una singularidad al monumento histórico y religioso de Santa Ana. Es visible desde cualquier lugar del centro histórico, convirtiéndose en un punto de referencia importante de la ciudad. Presenta una planta cuadrada y se eleva sobre un sencillo basamento de piedra. Los muros tienen vanos simples y una espadaña con dos arcos de medio punto rematados en las cuatro direcciones. El techo está hecho de carpintería a cuatro aguas y tejas coloniales.

Figura 3. 2

Vista de la Torre Exenta



Elaborado por: las autoras

Figura 3. 3

Campanario y Vanos – Arco de Medio Punto



Elaborado por: las autoras

Figura 3. 4

Alero con Rollizos y Canes de Madera



Elaborado por: las autoras

Figura 3. 5

Base de la Torre (Mampostería de Piedra)



Elaborado por: las autoras

El Templo de Santa Ana se ubica en un área topográficamente destacada sobre el resto de la ciudad (Figura 3.6), que solía ser una plataforma ceremonial llamada Markatampu. En este sitio se llevaban a cabo rituales, incluyendo sacrificios humanos, en tiempos prehispánicos. La eliminación de esta antigua práctica religiosa probablemente fue una de las razones por las cuales se estableció allí un templo cristiano en el siglo XVI. Además, el camino inca a Chinchaysuyo, una parte importante del Qhapaq Ñan (el sistema vial incaico), atraviesa este lugar

hasta el día de hoy. Este camino conectaba la región de Huancavelica, donde se extraía mercurio, y los abundantes depósitos de plata en Potosí, en la región del Alto Perú. A lo largo de este trayecto, Cusco desempeñaba un papel estratégico y económicamente crucial como un punto de tránsito privilegiado.

Figura 3. 6

Contexto Urbano de Cusco en 1650



Nota: Panorama de Monroy (1650), en el ángulo superior derecho se aprecia el barrio de Santa Ana, destacando el arco y las estructuras del templo. Catedral del Cusco

Fuente: Municipalidad del Cusco, 2007

En relación a nuestro objeto de estudio, la Torre Exenta, hay evidencia gráfica de su existencia en 1643 (ver Figura 3.7). Según se desprende del Panorama de Monroy, esta estructura fue destruida durante el terremoto de 1650. En el siglo XX, una nueva torre fue construida en el mismo lugar, pero con características muy diferentes a la original. Sin embargo, esta torre fue demolida y reconstruida como parte de los proyectos llevados a cabo por la Junta de Reconstrucción y Fomento Industrial del Cusco entre 1951 y 1956. Desafortunadamente, esta reconstrucción no tuvo en cuenta los registros documentales ni la forma de la antigua torre que se

derrumbó en 1950, lo que ha llevado a considerarla como un falso histórico. Esta reconstrucción no está respaldada por testimonios que hubieran justificado una intervención histórico-analítica. A pesar de esto, la torre sigue siendo imponente en la plazoleta, como una atalaya que domina toda la ciudad.

Figura 3. 7

Evidencia Gráfica de la Torre Exenta



Nota: Se presenta una vista del área urbana que rodea el Templo de Santa Ana en 1643. En la imagen se puede observar el atrio del templo, con especial énfasis en su diseño y la torre exenta. También se destaca la presencia del antiguo arco que se erigía en el camino hacia Chinchaysuyo

Fuente: Municipalidad del Cusco, 2007

3.3. Definición de Variables

3.3.1. Definición conceptual

Variable x: Análisis Modal Operacional

Variable y: Propiedades dinámicas de vibración

3.3.2. Definición Operacional

Tabla 3. 1

Definición Operacional de Variables

Variable	Definición Operacional
Análisis Modal Operacional	Parámetros modales
Propiedades dinámicas de vibración	Comportamiento dinámico

Elaborado por: las autoras

3.4. Operacionalización de Variables

Tabla 3. 2

Operacionalización de Variables

Variables	Dimensión	Indicador	Instrumentos
Variable Independiente			
Análisis Modal Operacional	Parámetros Modales	Frecuencia natural	Acelerómetros
		Modos de vibración	Sistema de adquisición de datos
		Coefficiente de amortiguamiento	Signal Express ARTeMIS Modal PRO
Variable Dependiente			
Propiedades dinámicas de vibración	Comportamiento dinámico	Levantamiento geométrico	Agisoft Metashape
		Modelo numérico de elementos finitos	AutoCAD
		Modelo numérico calibrado	SAP 2000 MATLAB

Elaborado por: las autoras

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.5.1. Instrumentos

- Libros
- Fuentes bibliográficas
- Artículos
- Conferencias
- Wincha
- Equipo fotogramétrico
- Acelerómetros
- Equipo de transductor de data
- Computadora con programa de Ingeniería

3.5.2. Técnicas

Observaciones directas: Analizar las variables en su entorno natural, observando intencionalmente los fenómenos que actual sobre el objeto de estudio.

Análisis de contexto: Interpretando la información adquirida por diversas fuentes bibliográficas tanto nacionales como internacionales, además de sacar medidas de la Torre Exenta del Monumento Histórico Santa Ana.

Toma de datos: A través del empleo de dispositivos para una posterior evaluación y análisis en un entorno de estudio.

3.6. Técnicas e Instrumentos de Procesamiento de Datos

3.6.1. Técnicas

El trabajo de gabinete consistió en procesar datos reunidos a través de las observaciones y medidas que se hizo durante la recolección de datos. Además de diseñar la torre Exenta, levantarlo geoméricamente en 3D y procesar datos adquiridas de los ensayos experimentales.

3.6.2. Instrumentos

- Materiales de escritorio
- Programas de computo
- Visio
- Agisoft Metashape
- Autocad 2D Y 3D
- SAP 2000
- Signal Express
- ARTeMIS Modal PRO
- MATLAB

CAPÍTULO IV

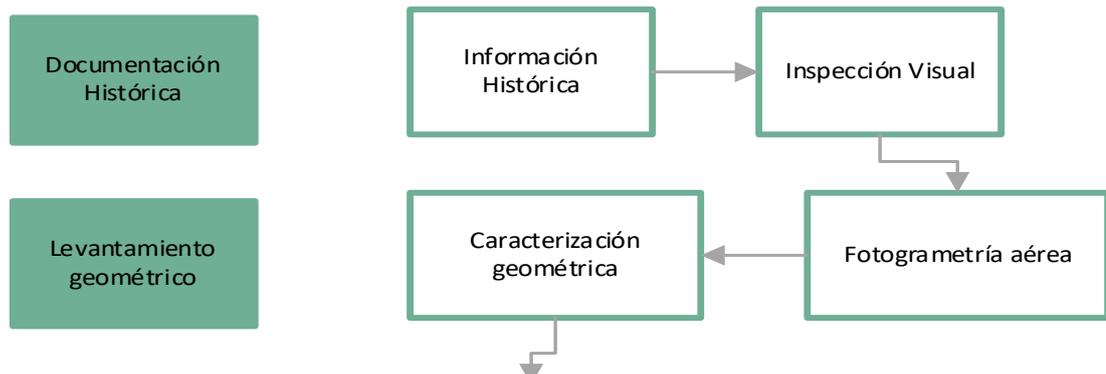
DESARROLLO

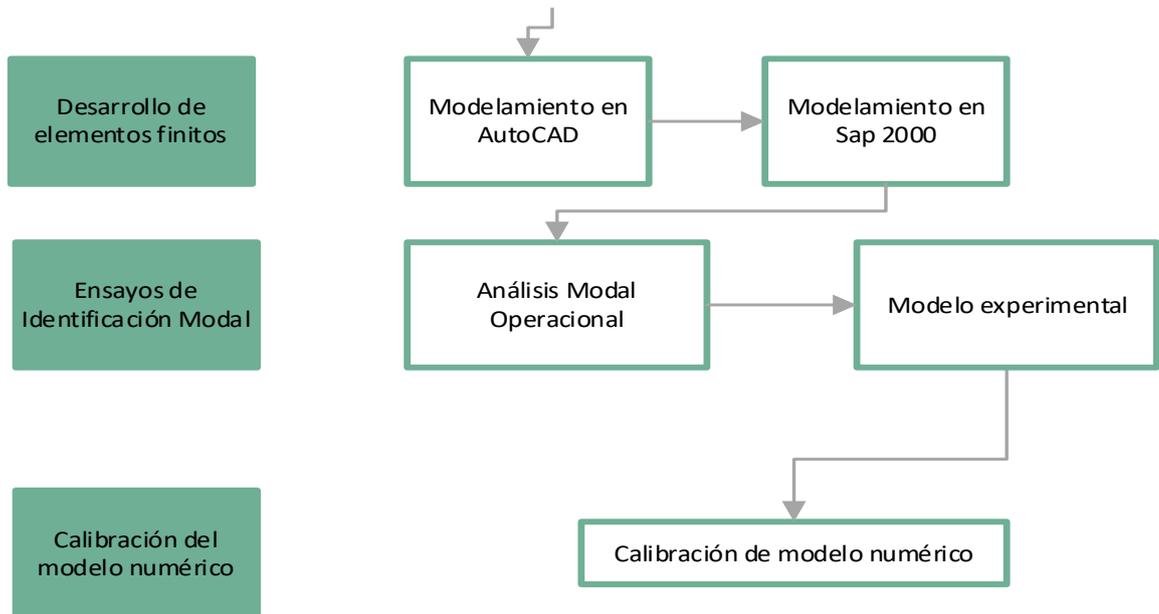
4.1. Mapa de Procesos

Se ha aplicado un enfoque metodológico que sigue las directrices internacionales y nacionales para el análisis, preservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico, tal como lo estableció ICOMOS en 2004. Asimismo, se enfoca en la recopilación de datos y la predicción de las propiedades dinámicas como aspectos fundamentales para la preservación de los monumentos. En la Figura 4.1 se establecen las actividades llevadas a cabo.

Figura 4. 1

Mapa de Procesos





Elaborado por: las autoras

4.1.1. Métodos de trabajo

Las actividades llevadas a cabo, serán detalladas en los siguientes apartados.

Documentación histórica: Se ejecutó la búsqueda completa y detallada de información acerca del monumento histórico religioso de Santa Ana, abarcando su historia, eventos sísmicos anteriores y procesos de restauración realizados en él. Además, se proporcionó una descripción minuciosa de la reseña histórica de la iglesia. Para evaluar el estado actual del edificio, se realizó una inspección visual exhaustiva que posibilitó la identificación de anomalías presentes en las partes visibles de la estructura.

Levantamiento geométrico: Antes de comenzar el levantamiento fotogramétrico, realizamos una planificación adecuada, esto implicó determinar la ubicación de las cámaras y los ángulos de disparo necesarios para capturar la Torre Exenta desde diferentes perspectivas. También se consideró factores como la iluminación, las condiciones atmosféricas y la seguridad durante la captura de las imágenes. Una vez planificado, se capturó una serie de imágenes desde diferentes

ángulos, posteriormente se realizó el procesamiento de datos en el software Agisoft Metashape a partir de ello se realizó el levantamiento geométrico en el software AutoCAD, para luego ser exportado al SAP 2000.

Desarrollo de EM: Al importar la geometría en el SAP 2000 utilizando las herramientas de diseño y dibujo disponibles, se definieron los elementos estructurales, y se asignaron propiedades a estos elementos, como materiales y secciones transversales. Una vez que el modelo está definido, se genera una malla de EM para discretizar la estructura y analizarlas. Los resultados arrojaron los máximos desplazamientos los cuales fueron utilizados como punto de referencia para que se obtengan los parámetros modales de la Torre Exenta in situ.

Ensayos de Identificación Modal: La información recopilada en las investigaciones previas fue utilizada para diseñar una estrategia de exploración en el campo y llevar a cabo ensayos no destructivos mediante análisis modal operacional, se realizaron evaluaciones, como el ensayo de vibración ambiental, donde se transformó las aceleraciones en señales eléctricas, los datos fueron procesados mediante un Data logger y un ordenador.

Calibración del modelo numérico: Posteriormente, se ejecutó la calibración del modelo numérico de la Torre Exenta utilizando los hallazgos de los ensayos de vibración ambiental (formas modales de vibración, coeficientes de amortiguamiento, frecuencias naturales). Se desarrolló el calibrado del modelo de EM, optimizando los valores de los parámetros identificados y reduciendo las diferencias entre la respuesta experimental y la respuesta numérica mediante el coeficiente de semejanza modal (MAC).

4.2. Documentación Histórica

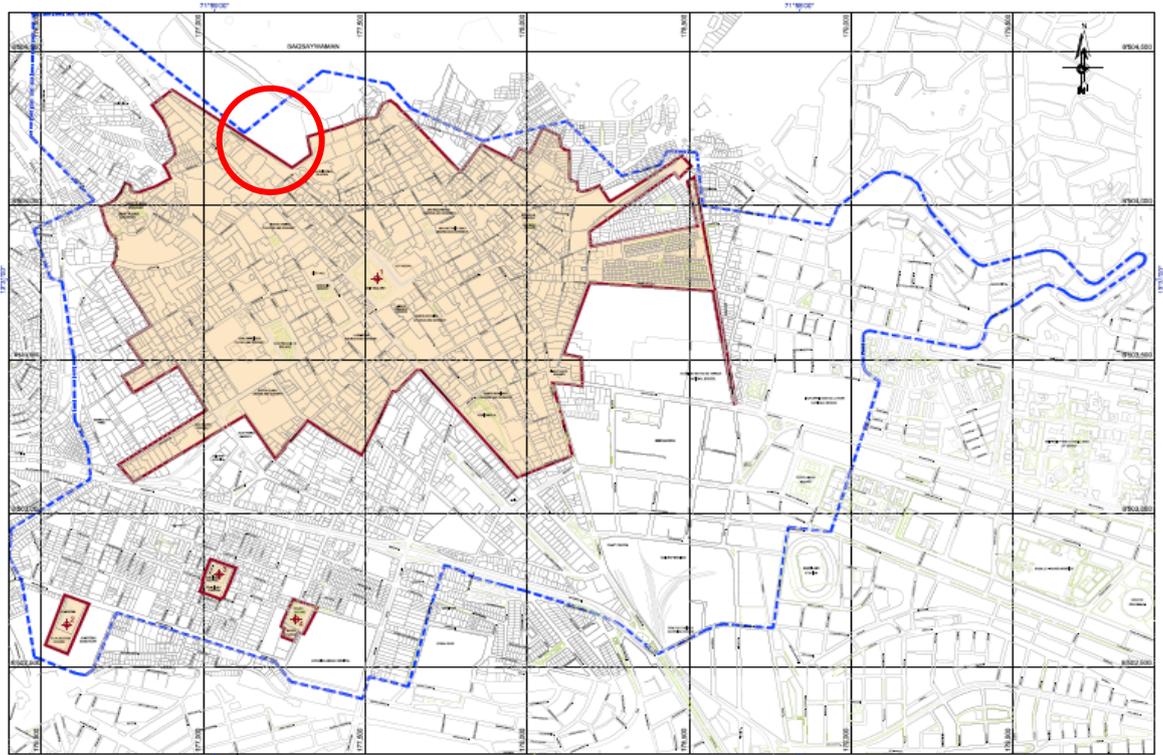
4.2.1. Ubicación

El Templo de Santa Ana está situado en el Barrio de Santa Ana, en la parte noroeste de la ciudad de Cusco, dentro del

distrito que pertenece a la provincia que está incluida en el departamento del mismo nombre. Se encuentra en el área conocida como Karmenca, en un promontorio, y su fachada da hacia la plazoleta que también lleva el nombre de Santa Ana. Sus coordenadas de ubicación son aproximadamente $x=8504500$, $y=177000$ a una altitud de 3,450 msnm.

Figura 4. 2

Ubicación del Templo en Cusco



Fuente: Ministerio de cultura, 2023

4.2.2. Accesibilidad y transporte

Debido a su ubicación en Cusco, el Templo de Santa Ana cuenta con buena accesibilidad y opciones de transporte. Es fácil llegar a esta zona por medio de una vía asfaltada que es transitada por diversas líneas de transporte público. Sin embargo, para transportar materiales destinados a la construcción, se deben programar los horarios de entrega de manera que no interrumpan el tráfico y permitan una descarga sin inconvenientes.

4.2.3. Clima

Este Templo está situado en el valle del Cusco, en pleno corazón de la ciudad. Esta región pertenece a una zona interandina con características particulares, como una temperatura promedio superior a los 10°C. El clima en esta área se divide en dos estaciones bien marcadas: el invierno, que abarca desde mayo hasta octubre, se caracteriza por la ausencia de precipitaciones y temperaturas cálidas durante el día; por otro lado, el verano austral, que va de noviembre a abril, se distingue por ser una temporada lluviosa, fresca, húmeda y con vientos que predominan en las tardes.

4.2.4. Topografía

En la actualidad, el Templo se sitúa en un plano elevado con referencia a la plaza principal de Santa Ana, con un desnivel aproximado de 1.80 metros. Los registros indican que el templo está edificado sobre terrazas y que en el pasado el atrio presentaba una inclinación que comenzaba en el punto donde se erige la torre y se elevaba hacia la casa cural. La topografía de la región no exhibe irregularidades marcadas ni rasgos geográficos notables. La elevación sobre la que se erige el templo le proporciona una posición prominente en relación a su entorno cercano, especialmente en la parte inferior, mientras que en la zona superior mantiene el perfil urbano característico de dicha área.

4.2.5. Reseña histórica del Monumento Histórico religioso Santa Ana

Este Templo representa un notable monumento religioso que data del período virreinal peruano. Es un componente valioso del patrimonio histórico en la antigua capital inca, situada a una altitud de 3,350 msnm en la región suroriental del Perú.

Situado en la porción noroccidental de la ciudad, conocida desde la época de los incas como Karmenqa, este edificio

tiene una rica historia de ocupación en el valle de Cusco (Zecenarro G., 2007). A lo largo de diferentes períodos, desde el Formativo hasta el Horizonte Tardío, se han encontrado vestigios de asentamientos humanos en esta zona, incluyendo contextos religiosos de importancia sistematizados en secuencias, como los adoratorios del cuadrante que pertenece a Chinchaysuyo (Bauer, 2000).

El lugar donde se ubica el Templo de Santa Ana presenta particularidades topográficas notables comparados con el resto de la ciudad (Figura 4.3). En el pasado, esta área era una plataforma ceremonial denominada Markatampu, donde se llevaban a cabo rituales que implicaban incluso sacrificios humanos (Bauer, 2000).

La abolición de esta práctica religiosa prehispánica podría haber influido en la elección de establecer un templo cristiano en este sitio en el siglo XVI (Zecenarro B., 2005). Además, el Camino Inca hacia Chinchaysuyo atraviesa este lugar hasta el día de hoy. Formaba parte del Qhapaq Ñan, una red de caminos que conectaban la región de Huancavelica, productora de mercurio, con los ricos depósitos de plata en Potosí. Cusco desempeñaba un papel crucial como punto de paso en esta ruta y gozaba de beneficios económicos significativos.

Figura 4. 3

Ubicación del Templo Santa Ana en el centro histórico



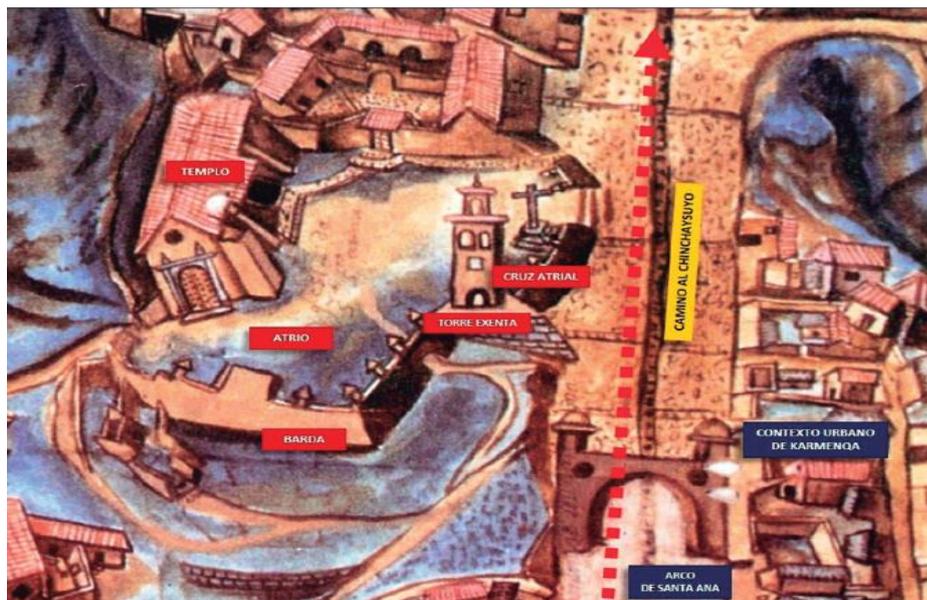
Fuente: Google LLC _ Google Earth, 2023

En el año 1562, conforme a las disposiciones del virrey Andrés Hurtado de Mendoza, se detalla que, el corregidor del Cusco, llamado Juan Polo Ondegardo fundó la Parroquia de Indios de la Gloriosa Santa Ana al noroccidente de la ciudad. Esta parroquia se estableció como una de las primeras cinco parroquias en el Cusco. El diseño urbano de la parroquia se desarrolló en este entorno, extendiéndose por las empinadas pendientes características de la topografía local (Figura 4.4). El paisaje urbano estaba marcado por su edificio religioso principal, construido sobre la plataforma inca (Vidal, 1958).

Los registros históricos relacionados con la estancia del virrey Toledo señalan que este entorno urbano albergaba a varios ayllus, incluyendo Qollana Wanka, Yanakuna, Kayau Qispiwara, Poroy y Chinchaysuyu. Además, también residían allí los grupos étnicos Chachapoya y Kañari, quienes se habían establecido en la zona y habían recibido concesiones y privilegios por parte de los españoles debido a su contribución en la lucha contra los incas.

Figura 4. 4

Sector Urbano del Templo de Santa Ana, en 1643



Nota: Se observa el espacio abierto en frente del templo, donde se resalta la forma y volumen del atrio, así como la torre exenta. Además, llama la atención el arco histórico que se erige en el camino hacia el Chinchaysuyo

Fuente: Municipalidad del Cusco, 2007

4.2.6. Análisis Arquitectónico

Planta: El Templo tiene una planta de forma rectangular, y su entrada principal se encuentra en uno de los lados laterales, específicamente en el muro de la epístola. Para acceder al templo desde la plaza, se utilizan escaleras de piedra. El templo está elevado sobre una plataforma en relación con la plaza de Santa Ana. En el área del muro frontal del templo, se encuentra adosada la parroquia en una disposición en forma de "L". Por otro lado, en el muro opuesto, conocido como el muro del Evangelio, se ubica la sacristía y también áreas abiertas. En cuanto al interior del templo, este está compuesto por una nave que tiene una forma alargada y dimensiones regulares (Guevara Boza , 2007).

Nave: Dentro de la nave del templo, es posible contemplar un total de ocho retablos de estilo neoclásico. Estos retablos están elaborados en yeso y presentan una combinación de colores azul y blanco, adornados con detalles decorativos en tonos dorados. En el muro correspondiente a la parte lateral derecha del presbiterio, específicamente en el muro de la epístola, se encuentran dispuestos cuatro retablos. Estos retablos albergan las imágenes religiosas del Señor de la Sentencia, el Señor de la Exaltación, la Virgen Dolorosa y la Virgen del Carmen. Del mismo modo, en el muro opuesto, conocido como el muro del Evangelio, también se pueden apreciar cuatro retablos. Estos retablos albergan las figuras sagradas del Señor de Luren, Santa Ana, el Señor del Cabildo y la Virgen de la Natividad (Guevara Boza , 2007).

El suelo en el interior de la nave está elaborado con tablones de madera machihembrada. Los muros, que están contruidos de adobe, han sido revestidos con yeso en ciertas áreas y pintados de blanco. Para los cimientos y sobre cimientos se ha utilizado piedra como material de construcción. La cubierta del templo está compuesta por vigas y viguetas de madera, sobre las cuales se han colocado capas de carrizo, mezcla de barro y tejas cerámicas. Los vanos de las ventanas, que son altos y tienen forma abocinada, presentan diferentes características; algunos de ellos están cerrados (Guevara Boza, 2007).

Es relevante destacar que el templo no cuenta con el arco toral, una característica común en la arquitectura de templos de la época, que se encuentra entre el presbiterio y la nave. Pero, en su lugar, se pueden observar cuatro escalinatas de piedra que cumplen una función jerárquica y señalan el contraste de niveles entre la nave y el presbiterio, resaltando la distinción entre estos dos espacios (Guevara Boza, 2007).

Dentro de la nave se ha descubierto recientemente una cripta, gracias al trabajo del arqueólogo Reynaldo Bustinza. La cripta consta de dos bóvedas de cañón corrido: una bóveda más corta que facilita el acceso y el descenso a la cripta, y una segunda bóveda que forma la cámara de la cripta propiamente dicha. Estas bóvedas han sido construidas utilizando ladrillos pasteleros como material (Guevara Boza, 2007).

Presbiterio: ubicado en la parte posterior de la nave, se delimita por un ábside con forma ochavada. Para acceder al presbiterio desde la nave, se deben subir cuatro escalones de graderías de piedra. Asimismo, se destaca un altar que alberga la imagen del Señor del Santo Sepulcro. Esta imagen se encuentra resguardada por un panel de vidrio transparente y es iluminada desde su interior, lo que permite que sea visible desde la nave (Guevara Boza , 2007).

El muro frontal del templo está enlazado con el retablo principal, que también sigue el estilo neoclásico y está elaborado en yeso con una ornamentación en tonos blancos y dorados. El retablo consta de tres secciones verticales y una estructura superior rematada con pináculos del mismo material. En el centro del retablo se sitúa la imagen de la Virgen de Santa Ana. En la zona del presbiterio, el suelo se encuentra revestido con baldosas de piedra, mientras que los muros están contruidos con adobe y pintados de blanco. Los cimientos y sobrecimientos están realizados en piedra. En el muro frontal se notan dos aberturas que han sido cerradas, una de ellas justo detrás del altar principal, y otra, de dimensiones más pequeñas, en uno de los laterales. El techo presenta una disposición en

forma de harneruelo y está compuesto por vigas y nudillos de madera, sobre los cuales descansa el enchaclado formado por carrizo, torta de barro y tejas cerámicas (Guevara Boza , 2007).

Sacristía: La sacristía se encuentra enlazada al ábside, en el punto donde convergen los muros del evangelio y el muro frontal. El acceso a esta zona se presenta por medio de una puerta de madera de tono marrón, que presenta seis paneles tallados en relieve en la parte inferior. En el interior de la sacristía, en el lado derecho (muro de la epístola), se encuentra una hornacina y una pequeña puerta que conduce al patio trasero, la cual probablemente servía como una especie de despensa. En el lado izquierdo (muro del evangelio), se pueden observar dos ventanas con forma abocinada y un vano que ha sido cerrado. Además, recientemente se ha construido un muro divisorio que funciona como espacio de almacenamiento y tiene un ancho de 0.60 metros. En esta área, se nota el antiguo tipo de suelo con clavos en un estilo tradicional. Los pisos en la sacristía están compuestos por losetas de piedra y una parte de cemento, mientras que los muros están contruidos con adobe y cuentan con cimientos y sobrecimientos de piedra. El techo tiene una configuración a dos aguas, con una estructura compuesta por vigas, nudillos y sobre pares de madera, sobre los cuales se coloca el enchaclado conformado por carrizo, torta de barro y tejas cerámicas. No se observa un acabado en la parte superior del techo (Guevara Boza , 2007).

Sotocoro: El coro está ubicado en el lado izquierdo de la entrada principal del templo, situado dentro de la nave. Está compuesto por dos columnas, tres arcos y dos sotabancos de piedra que funcionan como elementos de soporte. El acceso al coro se logra a través de una serie de escaleras de piedra que se encuentran en la zona del sotocoro. En el muro trasero que separa el sotocoro del salón comunal, se puede identificar un vano que ha sido tapiado, mientras que en el muro del lado del evangelio también se encuentra otro vano que ha sido cerrado. El suelo del coro está formado por madera machihembrada, mientras que los muros están contruidos con adobe y cuentan con cimientos y sobrecimientos de piedra (Guevara Boza , 2007).

Coro: Para acceder al coro, se utilizan escaleras de piedra que parten desde la zona del sotocoro. El piso del coro está formado por madera machihembrada, y su barandilla, que rodea el espacio y mira hacia la nave, está hecha de madera de tonalidad verde. En las paredes del coro, se encuentran cuadros de la escuela Cusqueña que representan escenas y pasajes bíblicos (Guevara Boza , 2007).

Salón comunal: En la zona sur del templo, en la parte posterior del sotocoro, se puede observar una edificación de dos niveles construida con adobe. Aunque presenta características modernas, su proceso de construcción muestra serias deficiencias. Según la evaluación realizada, se presume que esta estructura se erigió sobre lo que originalmente constituía la entrada principal, el sotocoro (coro) y una porción de la nave del templo. En la actualidad, el primer nivel de esta construcción se utiliza como un espacio de reunión comunitaria, mientras que el segundo nivel se encuentra en estado de abandono (Guevara Boza , 2007).

Exterior del templo

Muro de la epístola: En el costado externo del muro de la epístola, se encuentra la entrada principal del templo, la cual está construida con piedra tallada y está flanqueada por dos columnas. Estas columnas cuentan con basamentos en la parte inferior y cornisamientos en la parte superior, lo que se asemeja a un entablamento clásico. En el centro de esta entrada destaca un arco de medio punto compuesto por capiteles y dovelas, que permite el acceso al interior del templo a través de una puerta de madera en tono azul añil. Esta puerta principal está adornada con bulas de bronce dispuestas en seis hileras, lo que agrega elementos decorativos a la puerta. En el exterior de la nave, se pueden observar cuatro contrafuertes unidos al muro de la epístola, así como dos vanos altos que albergan ventanas abocinadas (Guevara Boza , 2007).

En el costado derecho de la entrada principal, sobre una plataforma escalonada compuesta por tres niveles de piedra, se alza una cruz también elaborada en piedra. Los cimientos y sobrecimientos están hechos de piedra, mientras que los muros están

construidos con adobe y están pintados de blanco. El techo está cubierto por tejas cerámicas, con una extensión entre los contrafuertes, según señala Guevara Boza en 2007.

En el área sur del templo, se encuentra la estructura de dos pisos mencionada previamente, con una puerta de acceso hacia la plaza a través de una portada de piedra, y otra puerta que conecta al patio exterior del muro de la epístola. El primer piso cumple la función de salón comunal, mientras que el segundo piso se encuentra en estado de abandono y muestra serias deficiencias constructivas, especialmente en lo que respecta al techo, de acuerdo con el informe de Guevara Boza en 2007.

En el costado norte, adyacente al muro testero y al muro de la epístola, se ubica la parroquia, una estructura de dos niveles accesible desde la plaza a través de una portada elaborada en piedra. Los espacios de la parroquia tienen como propósito brindar servicios comunitarios y también sirven como residencia del párroco. Los muros están contruidos con adobe y están pintados de blanco, apoyados sobre cimientos y sobrecimientos de piedra. Los marcos de las ventanas están pintados en un tono azul añil y están protegidos por rejas de hierro de color negro, según descripción de Guevara Boza en 2007.

Muro del evangelio: En el costado externo del muro de la epístola, se pueden observar tres contrafuertes que demarcan el límite del muro. Estos contrafuertes están equipados con ventanas abocinadas, algunas de las cuales se encuentran selladas. La construcción de los muros se ha realizado mediante el uso de adobe, mientras que los cimientos y sobrecimientos se componen de piedra.

En el espacio abierto en el sector meridional, próximo al pasaje no identificado, se encuentran tres pequeños compartimentos designados para servicios sanitarios y una cocina. En el extremo norte, cercano al muro testero, se ubica la sacristía, mientras que en dirección oeste se dispone de un espacio al aire libre que está cubierto con montículos de tierra. En el perímetro del conjunto, se aprecia una porción de un cerco perimetral construido con adobe y fragmentos de muro de piedra.

Sin embargo, en la sección central hacia el norte, el cerco ha colapsado y limita con propiedades de carácter privado. En la dirección sur, se erigen edificaciones posteriores que incluyen espacios como una cocina, baños y almacenes. No obstante, estas edificaciones no siguen el estilo arquitectónico distintivo del templo (Guevara Boza , 2007).

Muro testero: El muro frontal del templo se sitúa en la parte norte. En su exterior, se pueden distinguir dos contrafuertes que contribuyen a reforzar su estructura. Unida a este muro a través del techo, se encuentra una construcción de dos niveles elaborada en adobe. Esta estructura se destina para servicios sanitarios. Además, se observa un pequeño espacio libre que conecta con la parroquia y marca el límite con propiedades privadas. El acceso a la sacristía se realiza mediante un pequeño vano presente en este mismo muro (Guevara Boza , 2007).

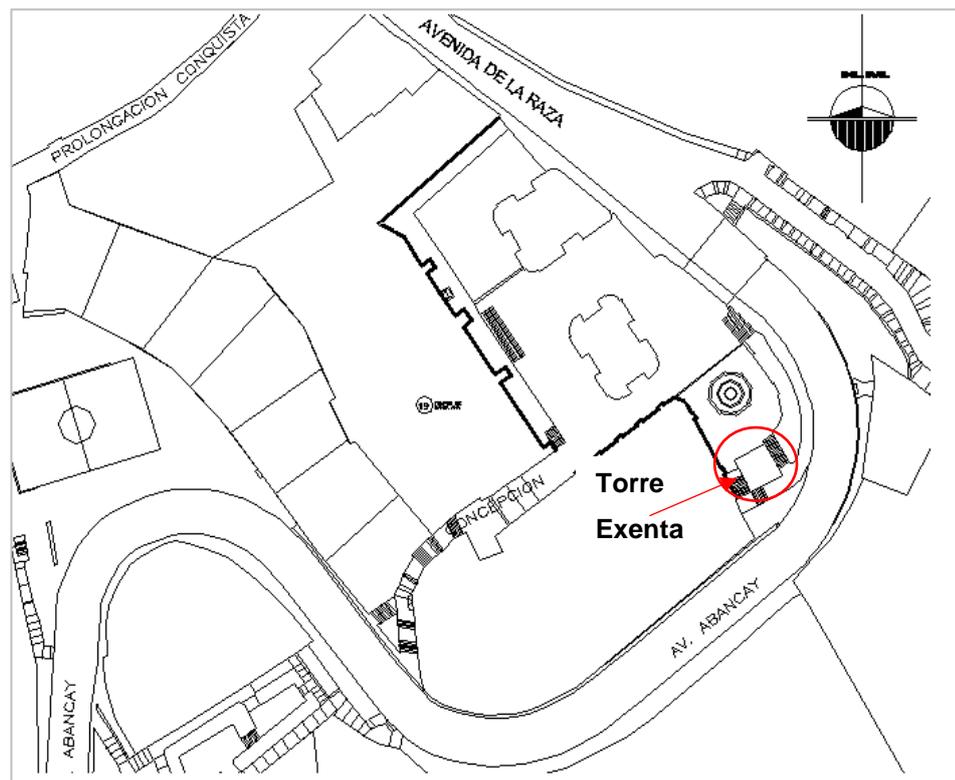
Coberturas: A lo largo de la construcción original del templo, todas las áreas están cubiertas por una estructura de madera que incluye vigas y nudillos. Sobre esta base, se han dispuesto elementos de soporte adicionales y luego se ha colocado el encajonado y, finalmente, las tejas cerámicas coloniales para proporcionar el acabado. A lo largo del tiempo, estas cubiertas han sido objeto de diversas intervenciones que han implicado cambios en los componentes de madera y en las propias tejas. Estos cambios han sido realizados como parte de un proceso continuo de mantenimiento y restauración. Sin embargo, estas intervenciones también han resultado en ciertas modificaciones o ajustes al diseño original de las cubiertas (Guevara Boza , 2007).

Torre Exenta – campanario excedente: La torre del templo, erigida en tiempos contemporáneos, está construida utilizando mampostería de adobe y presenta un sobrecimiento de piedra. En la sección superior de la torre, se pueden observar cuatro aberturas con forma de arco de medio punto que albergan las campanas. La cubierta de la torre sigue un diseño a cuatro aguas y está realizada mediante una estructura de madera, la cual está recubierta por tejas de arcilla para protección y acabado (Guevara Boza , 2007).

Es importante destacar que, aunque la torre fue construida en una época más reciente en comparación con otras partes del templo, su diseño y materiales fueron seleccionados para armonizar con el estilo arquitectónico original. Además, la torre no solo cumple un propósito funcional, sino que también añade un componente visual distintivo al paisaje urbano y religioso del área. Su combinación de materiales, diseño de vanos y la cubierta a cuatro aguas son elementos que reflejan tanto la tradición constructiva como la adaptación a las necesidades y estilos contemporáneos.

Figura 4. 5

Plano Catastro de la Torre Exenta



Fuente: Municipalidad del Cusco, 2007

4.2.7. Antecedentes sísmicos

Es plausible que los cimientos utilizados para la edificación de este templo, al igual que en muchas otras construcciones de la época, fueran compuestos con materiales locales disponibles en la región. En este contexto, se mencionan las piedras de huaca como posibles elementos utilizados en la fundación del templo. Sin embargo,

resulta interesante destacar que estas piedras tuvieron un doble significado, ya que no solo eran recursos materiales, sino que también tenían una relevancia simbólica.

La evangelización y el proceso de conquista llevados a cabo por los españoles implicaron una transformación profunda en las prácticas religiosas y culturales de las poblaciones originarias. En muchos casos, los templos y lugares sagrados preexistentes, como las huacas mencionadas, fueron destruidos tanto físicamente como simbólicamente. Los conquistadores impusieron sus propias creencias y sistemas religiosos, lo que resultó en la construcción de nuevos templos cristianos sobre los sitios previamente utilizados para rituales y veneraciones ancestrales.

Este proceso de reemplazar un santuario por otro refleja la dinámica de cambio cultural y religioso que ocurrió durante la colonización. Los cimientos del templo actual, compuestos por los materiales locales y con las piedras de huaca como posibles componentes, encapsulan este proceso histórico de superposición de creencias y transformación de lugares de culto. La construcción de un nuevo templo sobre las bases de las prácticas ancestrales no solo tuvo implicaciones arquitectónicas, sino que también marcó un cambio profundo en la cosmovisión y espiritualidad de las comunidades que habitaban la región.

El terremoto ocurrido el 31 de marzo de 1650 tuvo un impacto significativo en el proceso de desarrollo de la ciudad del Cusco. Este evento sísmico marcó un hito importante en la historia de la ciudad, ya que sus consecuencias fueron devastadoras y dieron lugar a una serie de transformaciones arquitectónicas y urbanas.

El terremoto provocó graves daños en gran parte de la ciudad, incluyendo sus templos y edificaciones religiosas. La magnitud de los daños fue tal que se requirió una reconstrucción casi completa de la ciudad. Los templos, que eran estructuras fundamentales en la vida y cultura de la sociedad cusqueña, resultaron especialmente afectados, lo que llevó a la necesidad de restaurar y rehabilitar estos lugares de culto.

La reconstrucción de los templos y de la ciudad en general no solo tuvo implicaciones arquitectónicas, sino también sociales y culturales. Las obras de reconstrucción representaron una oportunidad para la renovación y adaptación de los edificios, en muchos casos incorporando elementos arquitectónicos y estilísticos propios de la época. Además, el proceso de reconstrucción también implicó la reorganización de los espacios urbanos y la planificación de nuevas infraestructuras para prevenir futuros desastres.

En este contexto, el terremoto de 1650 se presentó un antes y después en la historia de la ciudad del Cusco. Aunque trágico en su impacto inicial, este evento llevó a una serie de cambios y desarrollos que contribuyeron a la evolución de la ciudad en términos arquitectónicos, urbanos y culturales.

“Era un conjunto de ruinas de Antonio. Santuario y el Real Colegio de San Bernardo, ya que la mayoría de sus dependencias fueron demolidas. Las famosas parroquias de Santa Ana y San Cristóbal sufrieron el mismo desastre...” (Esquivel & Navia, 1980), este terremoto fue un verdadero desastre, destruyó prácticamente toda la ciudad y hubo que reconstruir los templos y las casas: El templo de Santa Ana quedó Según Esquivel y Navia, en muy mal estado, habiendo perdido la mayor parte del espacio. Habitaciones, de lo que probablemente prosiguió su reconstrucción.

Podemos inferir que el templo de Santa Ana quedó completamente destruido, lo cual es bastante evidente si consideramos su estado en 1643 según el plano más antiguo de Cusco. En ese momento, el templo ya presentaba un techo deteriorado, un contrafuerte que posiblemente sostenía la estructura del muro lateral, cerca del muro frontal, y aparentemente dos estructuras para evitar el derrumbe del mencionado muro. Por lo tanto, es indudable que el templo tuvo que ser reconstruido y embellecido. La reconstrucción y ornamentación del templo ocurrió durante el tiempo en el que el Obispo Manuel Mollinedo y Angulo ejerció su cargo, siendo considerado como el Mecenaz de Cusco. Entre los

años 1673 y 1678, el obispo encargó la realización de varios lienzos con marcos de cedro a los artistas de la Escuela Cusqueña. Estas obras de arte fueron destinadas a decorar los muros del templo y representaban escenas como la ascensión de la Virgen, la Muerte de San Joaquín, Cristo cargando la cruz, entre otras.

El 17 de marzo de 1910, durante una fuerte lluvia, el templo de Santa Ana colapsó, lo que llevó a la pronta formación de un Comité Reconstructor presidido por Juan Pablo Villafuerte. La intervención consistió en reconstruir el templo desde sus cimientos.

El 21 de mayo de 1950, un terrible terremoto sacudió a Cusco, causando graves daños. Según Villanueva (1950), la torre del templo de Santa Ana se derrumbó hasta la mitad, hacia el lado que daba a la plazoleta. Debido a su estado, la parte que aún estaba en pie tuvo que ser demolida.

Figura 4. 6

Imágenes del Templo Santa Ana – 1945 y 1953



(a)



(b)

Nota: Las imágenes del Templo de Santa Ana correspondientes a los años 1945 y 1953 muestran cambios significativos en la apariencia del templo, la plazoleta y el barrio en general. Estos cambios se deben a las modificaciones causadas por el terremoto ocurrido en 1950.

Fuente: Expediente técnico, 2006

Después de la catástrofe causada por el terremoto, se formó la Junta de Reconstrucción y Fomento Industrial de Cusco en 1952, a través de un Decreto Supremo. Esta junta, asesorada por la UNESCO a través del Plan Kubler, se encargó de la restauración de los templos y casonas de Cusco. Entre 1951 y 1956, se llevaron a cabo importantes trabajos de restauración en monumentos coloniales, que en algunos casos se prolongaron hasta 1971. La reconstrucción de la torre del templo de Santa Ana fue realizada por el Ingeniero Lionel Villafuerte.

4.2.8. Intervenciones en el Monumento

A lo largo de los años, el templo de Santa Ana ha experimentado una serie de intervenciones, restauraciones y transformaciones que han dejado su marca en la historia y la apariencia de la

edificación. Estos eventos reflejan la importancia cultural y religiosa del templo en la comunidad, así como los desafíos que han surgido a lo largo del tiempo en cuanto a su mantenimiento y conservación. Aquí se presenta un resumen cronológico de las principales intervenciones y cambios en el templo:

- 1846: Se realizaron trabajos de restauración en el portal de la Sacristía y en su techo, como parte de los esfuerzos para mantener y mejorar la estructura.
- 1848: Se llevaron a cabo reparaciones en diversos elementos del templo, incluyendo el coro, la sacristía, el cuerpo del templo, los techos y la torre. Estas obras implicaron una inversión significativa y tomaron más de dos meses en completarse.
- 1857: Se registró en el inventario la caída de dos capillas y el deterioro del techo del templo, señalando los desafíos de conservación que enfrentaba la estructura.
- 1860: Un derrumbe del techo del templo requirió una inversión para su reparación. Los altares de las capillas caídas fueron trasladados a otras áreas del templo.
- 1910: Mención de elementos como el bautisterio antiguo, la capilla de Santa Bárbara y el templo con dos puertas, destacando la diversidad de espacios y usos en el templo.
- 1910 (17 de marzo): Un colapso del templo llevó a su reconstrucción desde cimientos, marcando un evento significativo en la historia del edificio.
- 1914: Se renovaron y reconstruyeron la Iglesia y la sacristía desde los cimientos, con un costo específico para la reconstrucción de la sacristía.
- 1915: Se describieron aspectos como la puerta única, el altar mayor de yeso y el púlpito a medio instalar. En 1917 se estrenaron nuevos altares.
- 1918: Finalización del altar mayor, instalación de altares laterales, cambios en el presbiterio y la ubicación provisional del bautisterio.
- 1921: Se construyó un contrafuerte debido al deterioro de la estructura.

- 1943: El templo necesitó una restauración debido a su estado deteriorado. Se mencionaron detalles como el revestimiento de madera y la existencia de ocho retablos.
- 1946: Se realizaron renovaciones en los techos y altares, incluyendo la colocación de un nuevo suelo.
- 1950: Un terremoto causó la destrucción parcial de la torre. La torre fue demolida debido a su deterioro.
- 1971: Se completó la reconstrucción de la torre bajo supervisión.
- 1967: Descripción del altar mayor y elementos artísticos en el templo.
- 1976: Se llevaron a cabo mejoras en el templo y la solicitud de apoyo para prevenir el deterioro.
- 1984: Se aprobó la construcción del mercadillo para unir la torre con el templo.
- 1993: Se remodeló la plaza principal para evitar su uso como cancha de fútbol.
- 2006 en adelante: Se han realizado restauraciones, investigación arqueológica y puesta en valor del templo.

Estos eventos históricos reflejan la evolución y el esfuerzo continuo por mantener y preservar el templo de Santa Ana a lo largo del tiempo, adaptándose a los desafíos y necesidades cambiantes de la comunidad y la arquitectura.

Durante los años 2016 y 2017, la administración municipal de Cusco retomó la iniciativa de revitalizar el entorno urbano cercano al Templo de Santa Ana a través del proyecto de Mejoramiento de la Plazoleta de Santa Ana. Este proyecto tuvo lugar en el barrio de Santa Ana, ubicado en el Centro Histórico de Cusco. Como parte de esta iniciativa, se llevó a cabo la demolición de la infraestructura del mercado que ocupaba el espacio.

4.2.9. Inspección visual

La inspección visual de edificios históricos es una práctica común utilizada para evaluar y diagnosticar el estado de

conservación de estas estructuras. Esta inspección se realiza de forma visual, sin la necesidad de realizar pruebas destructivas o invasivas, y permite detectar signos evidentes de daños, deterioro o problemas estructurales.

Todas las estructuras históricas exhiben patologías que nos proporcionan información sobre cómo han evolucionado con el tiempo y cuáles son las razones detrás de su deterioro. En el caso específico de la Torre Exenta del Templo de Santa Ana, las anomalías presentes son el resultado de factores ambientales constantes, como las condiciones climáticas húmedas, la influencia del terreno y los efectos de terremotos pasados, en particular el terremoto de 1950.

El proceso de inspección visual comenzó con un minucioso reconocimiento del sitio, realizando una exploración exhaustiva y planificando la ruta de inspección. Se obtuvieron los permisos necesarios de las autoridades responsables del lugar. Luego de la visita inicial, se elaboró una leyenda de datos (ver Figura 4.7) con el propósito de identificar anomalías y otros aspectos relevantes.

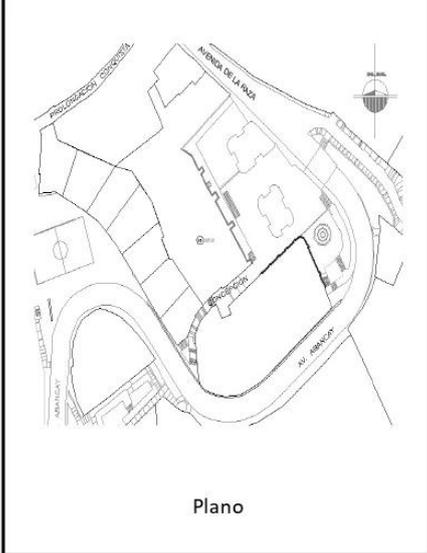
Es importante tener en cuenta que la inspección visual es un primer paso en la evaluación de un edificio histórico.

Se examinó la fachada de la Torre Exenta en busca de grietas, desprendimientos de revestimiento, humedad, erosión de la piedra u otros signos de deterioro. Se prestó atención a los elementos arquitectónicos específicos de la época y se comparó con fotografías o dibujos históricos para identificar cambios. Dando en conclusión que se visualiza erosión en el sobrecimiento de piedra.

Se examinaron los espacios interiores en busca de fisuras, desprendimientos de revestimiento, problemas de humedad o filtraciones. En conclusión, también se visualiza erosión de la piedra en la parte interna de la torre exenta.

Figura 4. 7

Ficha de Inspección Visual

	<p align="center">Inspección Visual de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso de Santa Ana</p>
 <p align="center">Fotografía</p>	<p align="right">Data de Inspeccion: 22/04/2023</p> <p>1. Datos Generales Nombre del objeto de estudio: Torre Exenta del Monumento Historico Religiosos Santa Ana Dirección: Barrio Santa Ana - Cusco - Cusco - Perú Año de Construcción: Entre los siglo XVI - XVII Área construida: 36 m2 aproximadamente Inspección realizada por: Huallpataype Carpio, Luz Carmen Masias Zanabria, Karla Paola</p> <p>1.1. Clasificación del objeto de estudio <input checked="" type="checkbox"/> Público <input type="checkbox"/> Privado</p> <p>1.2. Uso <input checked="" type="checkbox"/> Religioso <input type="checkbox"/> Museo <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____</p>
 <p align="center">Plano</p>	<p>1.3. Interes Arquitectónico e Histórico <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No</p> <p>1.4. Geometría de la Planta <input checked="" type="checkbox"/> Rectangular <input type="checkbox"/> Basilical <input type="checkbox"/> Cruz latina <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____</p> <p>1.5. Material dominante <input type="checkbox"/> Adobe <input type="checkbox"/> Piedra <input checked="" type="checkbox"/> Mixto</p> <p>1.6. Número de fachadas con aberturas Descripción: Fachada Norte -> 4 vanos Fachada Oeste -> 3 vanos Fachada Sur -> 2 vanos Fachada este -> 3 vanos</p>
<p>2. Intervenciones Realizadas <input type="checkbox"/> Conservación <input checked="" type="checkbox"/> Restauración <input type="checkbox"/> Remodelación</p> <p>Observaciones: Presenta una geometría irregular, compuesto por un sobrecimiento hecho de mampostería de piedra y cuerpo hecho por mampostería de adobe. No existen anomalías representativas, no existen grietas, únicamente pérdida de pintura en los muros de adobe.</p>	

Elaborado por: las autoras

4.3. Levantamiento Geométrico

La fotogrametría es una técnica sin contacto que se utiliza para medir el tamaño y la forma de un objeto a partir de varias fotografías en lugar de mediciones directas. El objetivo final del proceso fotogramétrico es obtener un modelo tridimensional de alambre que represente con precisión la geometría de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana, así como crear imágenes ortográficas o un modelo fotorrealista en 3D que incluya adecuadamente las texturas de la torre exenta.

El procedimiento estándar para inspeccionar un objeto mediante fotogrametría implica la recopilación de datos y la reconstrucción de un modelo sólido 3D. En este estudio, se utilizó un sistema monoscópico digital, ya que se considera más viable en aplicaciones de documentación patrimonial en términos de relación costo-eficacia que la fotogrametría estereoscópica.

Antes de realizar la recopilación de datos, se colocaron 9 puntos de control (Figura 4.9) con bandas rectangulares de cartulina alrededor de la estructura de la Torre Exenta, con el objetivo de mejorar la precisión de las imágenes y determinar sus medidas, como se muestra en las Figura 4.8.

Figura 4. 8

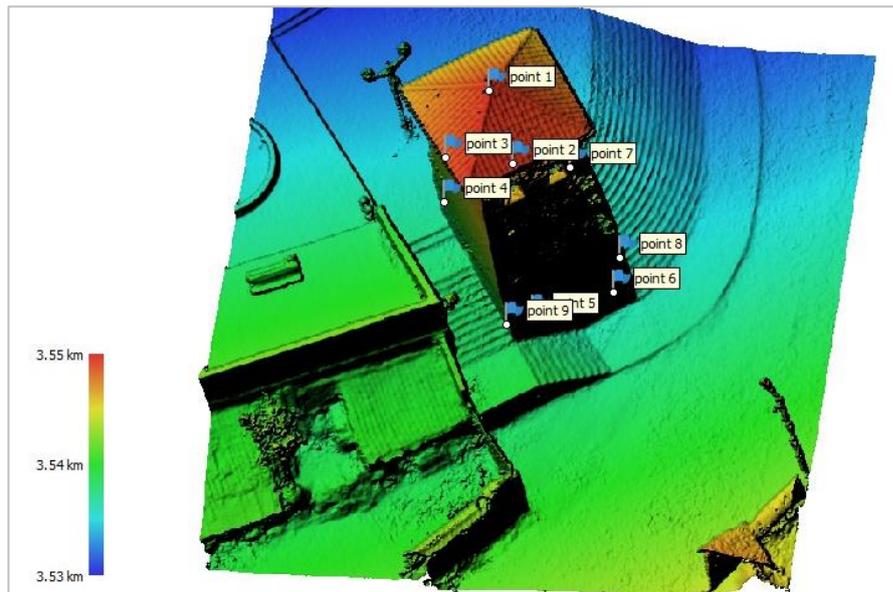
Procedimiento Antes de la Recolección de Datos



Elaborado por: las autoras

Figura 4. 9

Puntos de Referencia



Nota: Se colocaron 9 puntos de control en la Torre Exenta.

Elaborado por: las autoras

4.3.1. Recopilación de datos

El primer paso en todo el procedimiento consistió en obtener información geométrica de la Torre Exenta. Para lograr esto, se llevaron a cabo la toma de fotografías de la estructura utilizando el método de fotogrametría. Se utilizó una cámara digital marca DJI, y un dron de la marca DJI, modelo Mavic 1 (Figura 4.10) para las fotografías aéreas, siguiendo tres métodos: circular, 5 maneras y manual.

Figura 4. 10

Modelo de Dron Utilizado



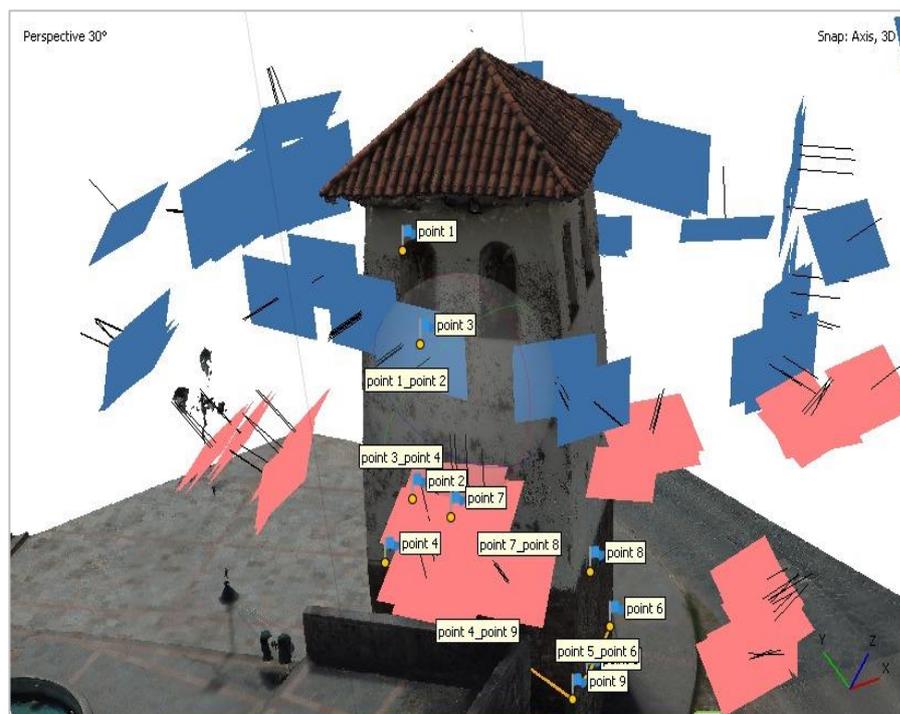
Elaborado por: las autoras

La utilización del dron resultó esencial debido a la dificultad de obtener imágenes convencionales del techo. Las fotografías aéreas capturadas por el dron se emplearon para crear un modelo tridimensional del módulo de adobe.

Se tomaron un total de 381 imágenes en tres series de vuelo a distintos ángulos de cámara y alturas como se puede detallar en la Figura 4.11.

Figura 4. 11

Plan de Vuelo Dron al Entorno de la Torre Exenta



Elaborado por: las autoras

4.3.2. Procesamiento de datos

Las fotografías digitales se importaron al software Agisoft Metashape. El software realizó un proceso de alineación de las fotografías, que consiste en determinar la posición y orientación de cada toma fotográfica. Una vez que se calcularon estos dos parámetros para cada fotografía, se generó una nube de puntos denominado nube de puntos dispersos utilizando los puntos comunes encontrados por el software durante la etapa de alineación de las imágenes digitales (Figura 4.12).

Figura 4. 12

Nube de Puntos Dispersa en la Torre Exenta



Elaborado por: las autoras

Después de completar la creación de la nube de puntos, se avanzó a la siguiente fase que consistió en generar una nube densa de puntos. Una vez culminada esta fase, se llevó a cabo un proceso de eliminación de los puntos que no formaban parte de la estructura de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso de Santa Ana o que fueron generados de manera incorrecta por el software. Esta selección manual de los puntos específicos para el modelo 3D se realizó de manera minuciosa y representa uno de los pasos más cruciales, ya que contribuye significativamente a mejorar la calidad visual del modelo tridimensional.

Empleando la nube de puntos densa depurada, se procedió a la creación de una malla que representa el muro en cuestión (Figura 4.13).

Figura 4. 13

Nube de Puntos Densa de la Torre Exenta

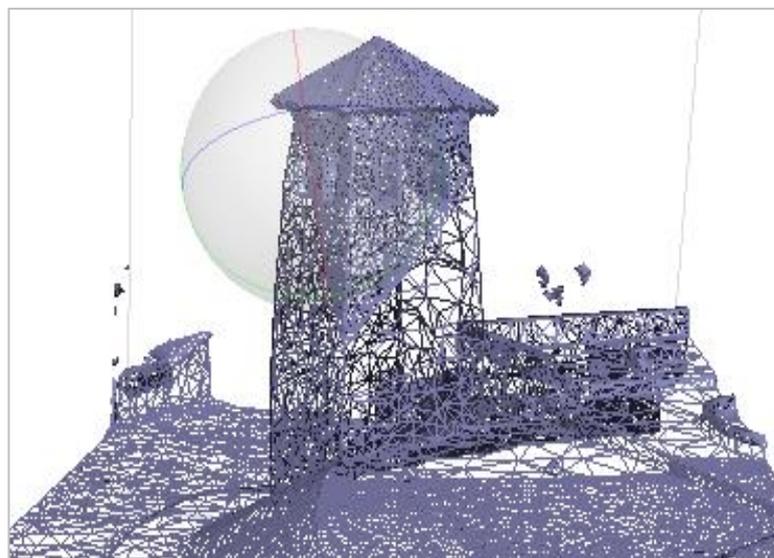


Elaborado por: las autoras

Teniendo la nube de puntos se procede a realizar una triangulación para obtener un modelo no continuo donde conjuntos de triángulos se han colocado en la superficie de la estructura.

Figura 4. 14

Modelo de Enmallado de la Torre Exenta



Elaborado por: las autoras

Finalmente, el software Agisoft Metashape ofrece la capacidad de aplicar texturas automáticamente a la malla utilizando la información de colores contenida en los puntos utilizados para que se construya la nube densa. El hallazgo final del proceso realizado con el software Agisoft Metashape se puede detallar en la Figura 4.15

Figura 4. 15

Enmallado con Textura de Colores



Elaborado por: las autoras

4.4. Desarrollo de Elementos Finitos

El propósito de la incorporación del modelo de elementos finitos (MEF) en la Torre Exenta del templo de Santa Ana fue examinar la respuesta dinámica teórica de sus componentes estructurales, con el propósito de obtener una primera evaluación de las frecuencias naturales y los modos de vibración asociados. Con el resultado se determinaron los máximos desplazamientos que fueron finalmente los puntos elegidos para la toma de datos durante la campaña experimental de vibración ambiental. Para el desarrollo del modelo de EF se tomaron en cuenta como propiedades mecánicas: el módulo de elasticidad, el módulo de Poisson y el peso específico, éstos datos fueron obtenidos de acuerdo a ensayos

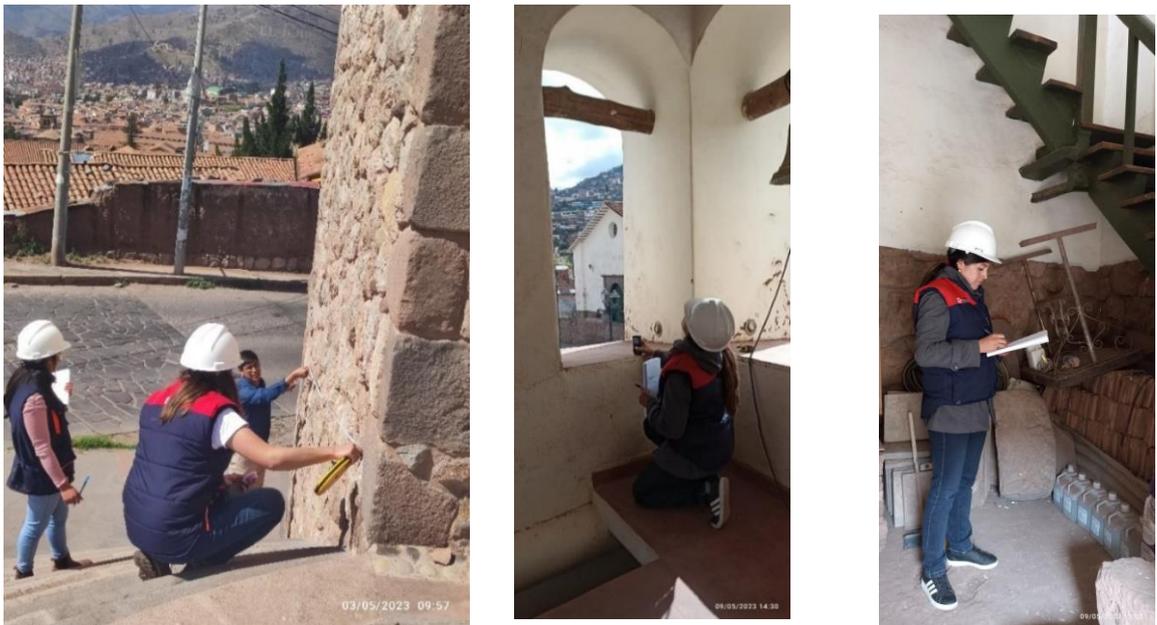
realizados en materiales de mampostería de piedra y adobe de edificios históricos, tal es el caso del templo de Andahuaylillas cuyos datos se utilizaron para la definición del material en mampostería de adobe y el templo de la Compañía de Jesús para la definición de las propiedades de la mampostería de piedra. Cabe destacar que para el modelamiento de los EF en el software SAP 2000 se realizó previamente una caracterización geométrica de la torre, para dicho fin se utilizó el software AutoCAD.

4.4.1. Caracterización geométrica

La geometría de la torre exenta de Santa Ana, se obtuvo tomando como base el levantamiento fotogramétrico aéreo y la toma de medidas manual del interior de la torre, para ello se hizo uso de distanciómetro y wincha, tal como se muestra en las siguientes Figuras.

Figura 4. 16

Toma de Medidas de la Torre Exenta del Templo Santa Ana



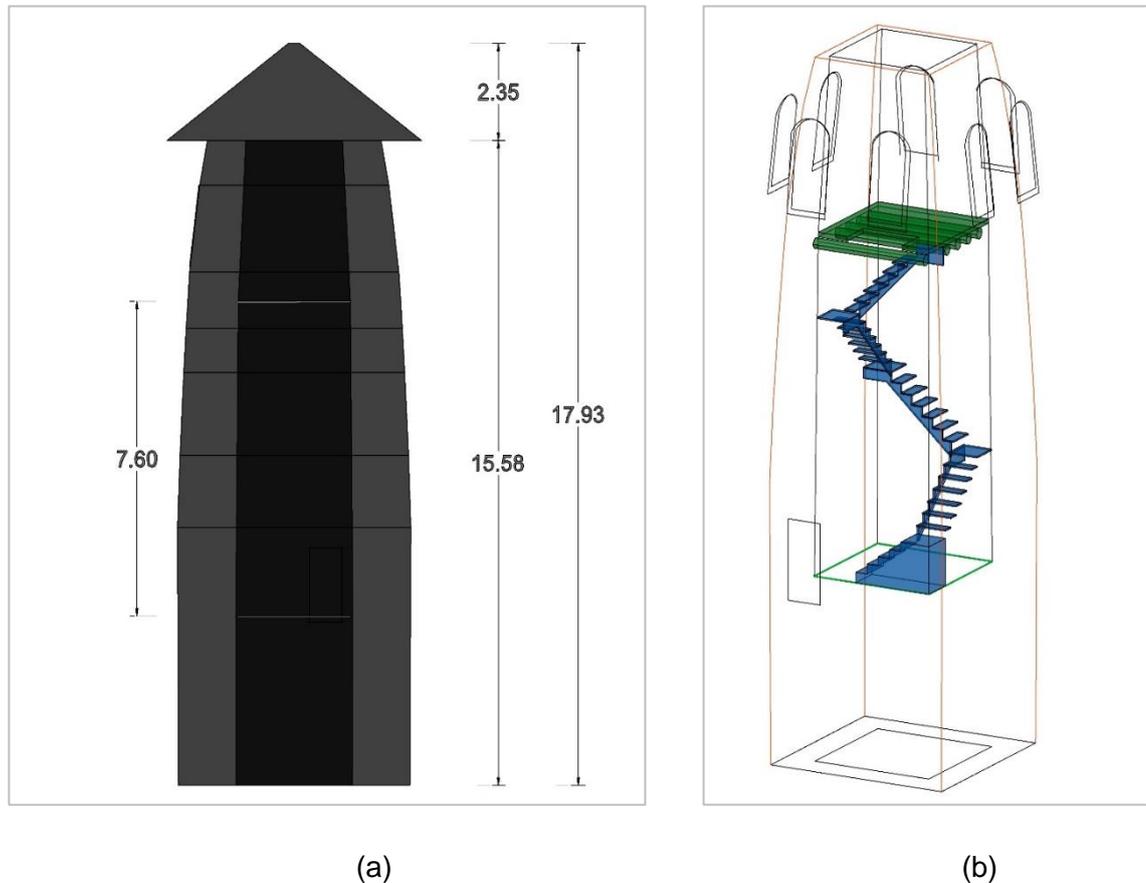
Elaborado por: las autoras

Se observó la irregularidad geométrica de la torre, la base presenta forma cuadrangular de 6.00m de ancho en cada lado, se ensancha a 6.02m y posteriormente reduce el ancho de sus lados hasta

alcanzar un ancho de 4.90m en la parte superior; la Torre Exenta tiene una altura de la base a la parte superior del muro de 15.58m y al techo de 17.93m como se muestra en la Figura 4.17 además se observa un ancho de muro variable, tiene 1.50m en la parte inferior y llega a 1.20m en la parte superior.

Figura 4. 17

Levantamiento Geométrico-AutoCAD 3D



Nota: a) Muro Sur de la Torre Exenta. b) Muro oeste y sur de la Torre Exenta.

Elaborado por: las autoras

La torre cuenta con una puerta de acceso al interior y un entrepiso a 7.60m de altura, el acceso al entrepiso es mediante unas escaleras de estructura metálica y tablas de madera distribuidas en todo el perímetro de los muros, el entrepiso está conformado por rollizos de 8", tablas y ladrillo pastelero, que en su conjunto haría el diafragma.

La mampostería de piedra alcanza una altura máxima de 6.23m y la mampostería de adobe 9.35m es de resaltar que, a manera visual, la mampostería de piedra tiene una altura variable en todos

los lados de la torre, esto debido al desnivel existente entre la plazuela donde se encuentra ubicado el templo Santa Ana con respecto a la vía vehicular. Siendo la altura máxima de la mampostería de piedra de 6.23m en el lado sur de la torre y la mínima en el lado norte con una altura de 2.00m.

Figura 4. 18

Desnivel Vehicular con la Torre Exenta

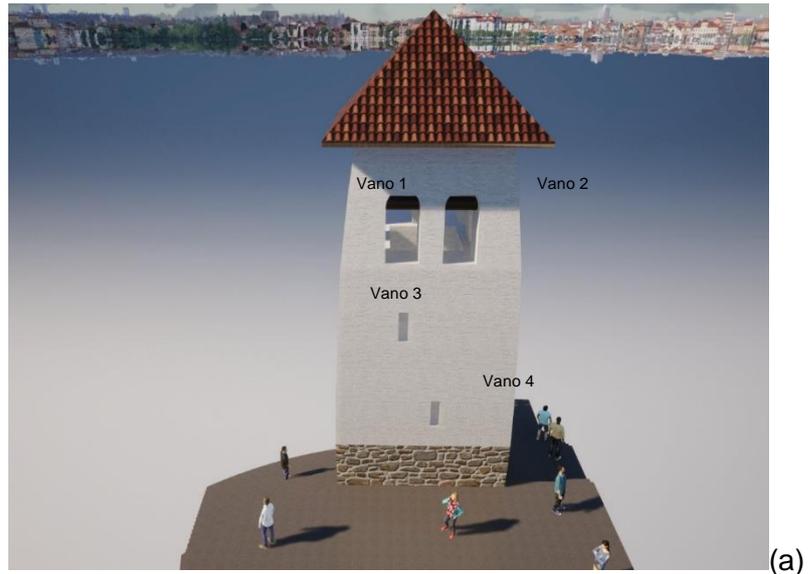


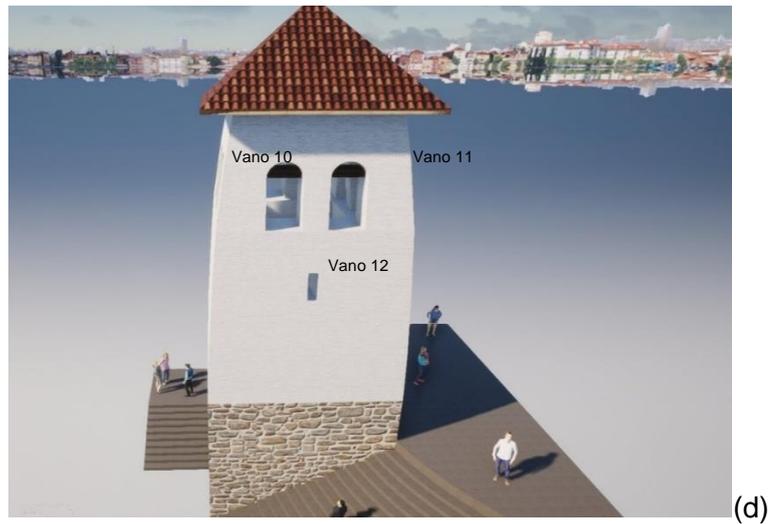
Elaborado por: las autoras

La torre exenta tiene 12 vanos distribuidos en sus 4 lados, 8 de ellos se encuentran en la parte superior, 2 en cada lado, son ventanas de forma rectangular y rematadas en un arco de medio punto; los 4 vanos restantes se distribuyen en la torre de la siguiente manera: uno de ellos ubicado en el muro oeste, de forma rectangular corresponden a la puerta de acceso al interior de la torre, otros 2 vanos se encuentran en el muro norte, ambos de forma rectangular, y finalmente 1 ubicado en el muro este también de forma rectangular.

Figura 4. 19

Distribución de Vanos en la Torre Exenta





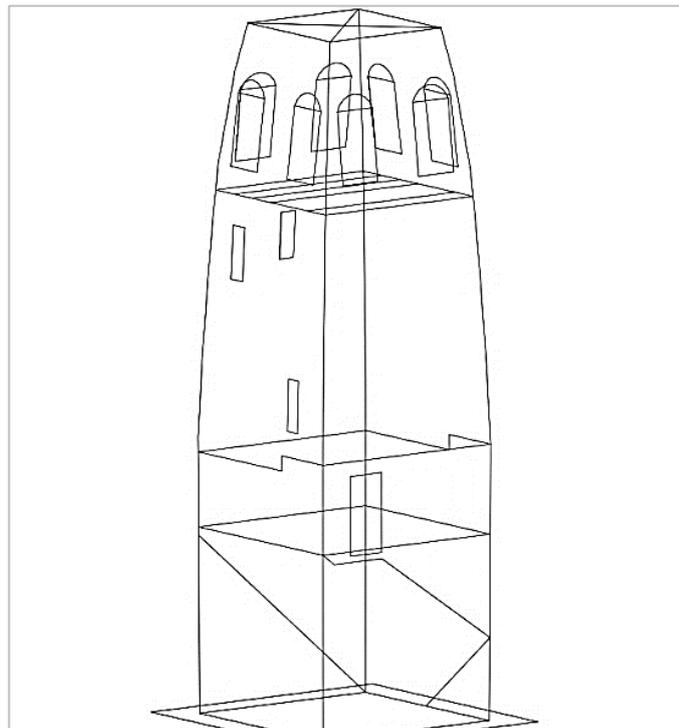
Nota: a) Elevación norte. b) Elevación oeste. c) Elevación sur. d) Elevación Este.

Elaborado por: las autoras

Finalmente se obtuvo un dibujo lineal de los ejes de la torre exenta en formato para ser importado en el software SAP 2000, se consideraron sus vanos, el entrepiso, los distintos niveles de piso para el empotramiento de la torre, así como los elementos frame ubicados en la parte superior.

Figura 4. 20

Formato DXF de la Torre Exenta



Elaborado por: las autoras

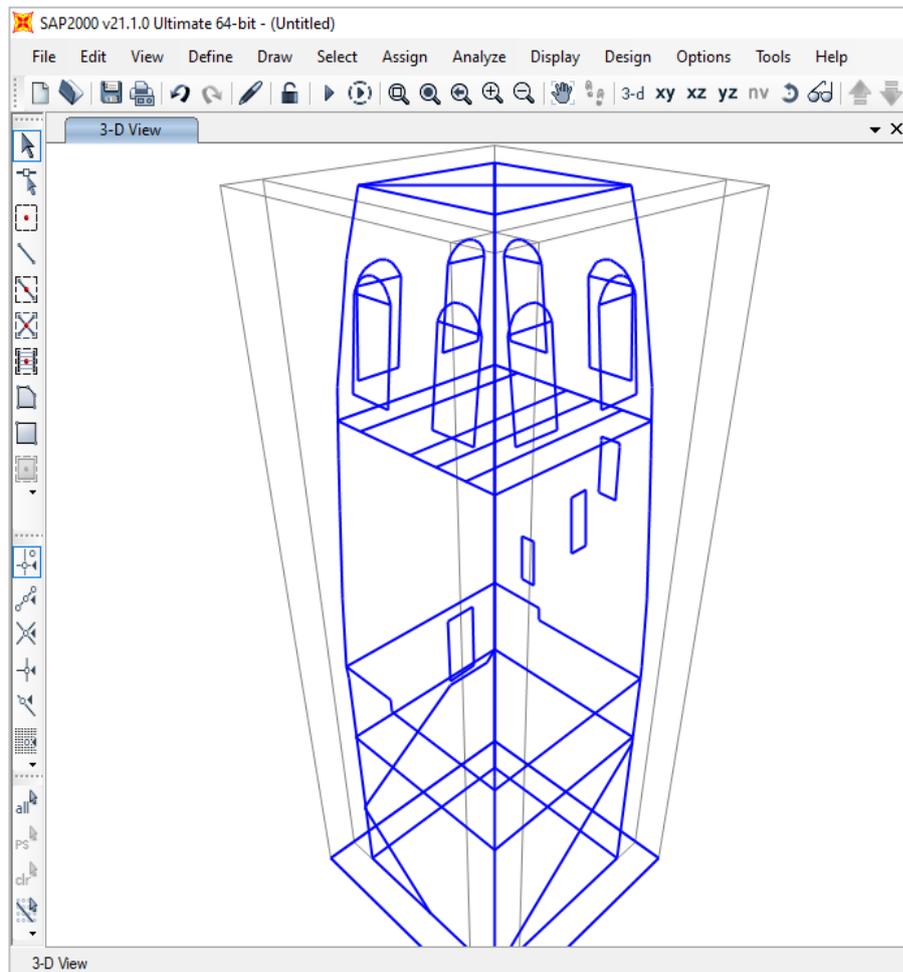
4.4.2. Modelamiento de EF en SAP 2000

Resultó de gran ayuda realizar la caracterización geométrica de la torre exenta en el software AutoCAD, con ella se pudo importar los ejes curvos de la mampostería de piedra y adobe, la importación del archivo se realizó desde la extensión DXF.

En la Figura 4.21 se muestra la representación gráfica de los ejes y los nodos interconectados que definen la forma y la estructura de la torre exenta. Esta figura revela una configuración geométrica irregular, con una base más amplia y una reducción progresiva en su parte superior. Esta caracterización arquitectónica se refleja en la disposición de los nodos y en la conectividad entre ellos, lo que contribuye a la singularidad y estética de la torre.

Figura 4. 21

Torre Exenta del Templo Santa Ana en SAP 2000



Elaborado por: las autoras

4.4.2.1. Definición de la mampostería adobe

Se establecieron las propiedades de peso específico, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para la mampostería de adobe utilizando como referencia los datos obtenidos en investigaciones anteriores. Para el peso específico, se consideró un valor de 1705.98 kg/m³, basado en mediciones de muretes de adobe realizadas en laboratorio en el estudio de (Condori & Gonzales, 2017). En cuanto al coeficiente de Poisson, se asumió un valor de 0.25, y para el módulo de elasticidad se consideró un valor de 5325.37 kg/cm², a partir de ensayos de propagación de onda en el templo San Pedro Apostol situado en Andahuaylillas en la investigación de (Condori & Gonzales, 2017).

Estos valores fueron utilizados como estimaciones para las características de la mampostería de adobe en el presente estudio.

Figura 4. 22

Definición de la Mampostería de Adobe

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	ADOBE
Material Type	Other
Material Grade	
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	1705.98
Mass per Unit Volume	173.9615
Units	
	Kgf, m, C
Isotropic Property Data	
Modulus Of Elasticity, E	53254700.
Poisson, U	0.25
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	21301880.

Elaborado por: las autoras

4.4.2.2. Definición de la piedra

Para que se determine las particularidades de la mampostería de piedra, se hizo uso del estudio de investigación de (Oré & Suárez, 2021).

Se tomaron como referencia los valores correspondientes a una mampostería de piedra irregular según las normas técnicas para la construcción de 2008 (NTC2008). Los datos utilizados fueron un peso específico de 1900 kg/m³, un módulo de elasticidad de 11216.9 kg/cm² y un coeficiente de Poisson de 0.20. Estos valores fueron empleados en el presente estudio como estimaciones para las propiedades de la mampostería de piedra.

Tabla 4. 1

Propiedades de Piedra Irregular

Referencias	Tipo de material	E	v	p
		Gpa		kg/m ³
NTC (2008)	Albañilería de piedra de tipo regular	1.75	0.2	2100
NTC (2008)	Albañilería de piedra de tipo irregular	1.1	0.2	1900

Nota: Módulo de elasticidad, Poisson y Peso específico de la piedra irregular que conforma el templo compañía de Jesús

Fuente: Oré & Suárez, 2021

Figura 4. 23

Definición de la Mampostería de Piedra Irregular

Elaborado por: las autoras

4.4.2.3. Definición de la madera

Se utilizaron las especificaciones de la NTP E.010 para determinar las particularidades de la madera. En cuanto al módulo de elasticidad, se consideraron las características correspondientes al agrupamiento B de maderas latifoliadas. Para el peso específico, se tomó como referencia un valor de 1000 kg/m³. Además, se estableció un coeficiente de Poisson promedio de 0.30, basándose en referencias bibliográficas. Estos parámetros fueron empleados en el estudio para definir las particularidades de la madera.

Tabla 4. 2

Módulo de Elasticidad para Madera Latifoliadas

Grupo	E min	E prom
	Mpa(kg/cm ²)	Mpa(kg/cm ²)
A	9 316(95 000)	12 748(130 000)
B	7 355(75 000)	9 806(100 000)
C	5 394(55 000)	8 826(90 000)
D	4 414(45 000)	6 400(65 000)

Fuente NTP E030, 2021

Figura 4. 24

Definición de la Madera

Elaborado por: las autoras

4.4.2.4. Definición de las secciones Shell y Frame

Luego de que se definan las particularidades de los materiales que incluye la torre exenta, se procedió a definir las secciones Shell y las secciones Frame, en cuanto a los Shell se observa distintas secciones de muros, en la parte inferior se tiene 1.50m de espesor de muro de mampostería de piedra, a medida que va subiendo la mampostería de adobe permanece con el mismo ancho, por debajo del entrepiso se asumió un ancho de 1.35m y por sobre el entrepiso se observa que el muro tiene un ancho promedio de 1.25m, en cuando a las secciones Frame, se observa que existen dos secciones, una de 6" ubicada en los vanos rectangulares rematados con un arco de medio punto y otras de 8" ubicadas en el entrepiso a manera de diafragma y en la parte superior del muro así como los que conforman el techo.

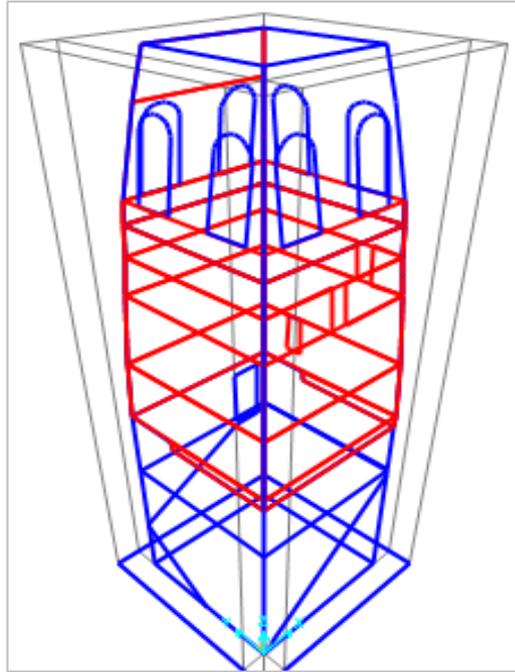
Debido a la irregularidad geométrica de la torre se trabajó por Shell para respetar la forma, esto garantiza una representación precisa y confiable de la estructura en el análisis y diseño. Para representar elementos lineales, como vigas, columnas, pórticos y marcos estructurales se utiliza el Frame. Estos elementos son unidimensionales y se definen por su longitud y sección transversal.

Por lo tanto, los elementos Frame se utilizan para elementos lineales, mientras que los elementos Shell se utilizan para elementos de superficie bidimensional.

También se realizó la división de Shell en elementos más pequeños para suprimir las áreas de los vanos que conforman la torre, tanto ventanas como la puerta de acceso al interior.

Figura 4. 25

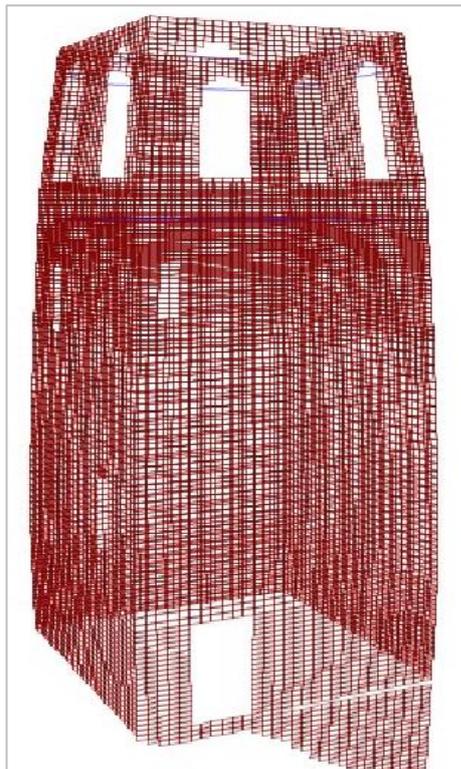
Dibujo de Shell y Frame



Elaborado por: las autoras

Figura 4. 26

División de Shell-Elementos Finitos

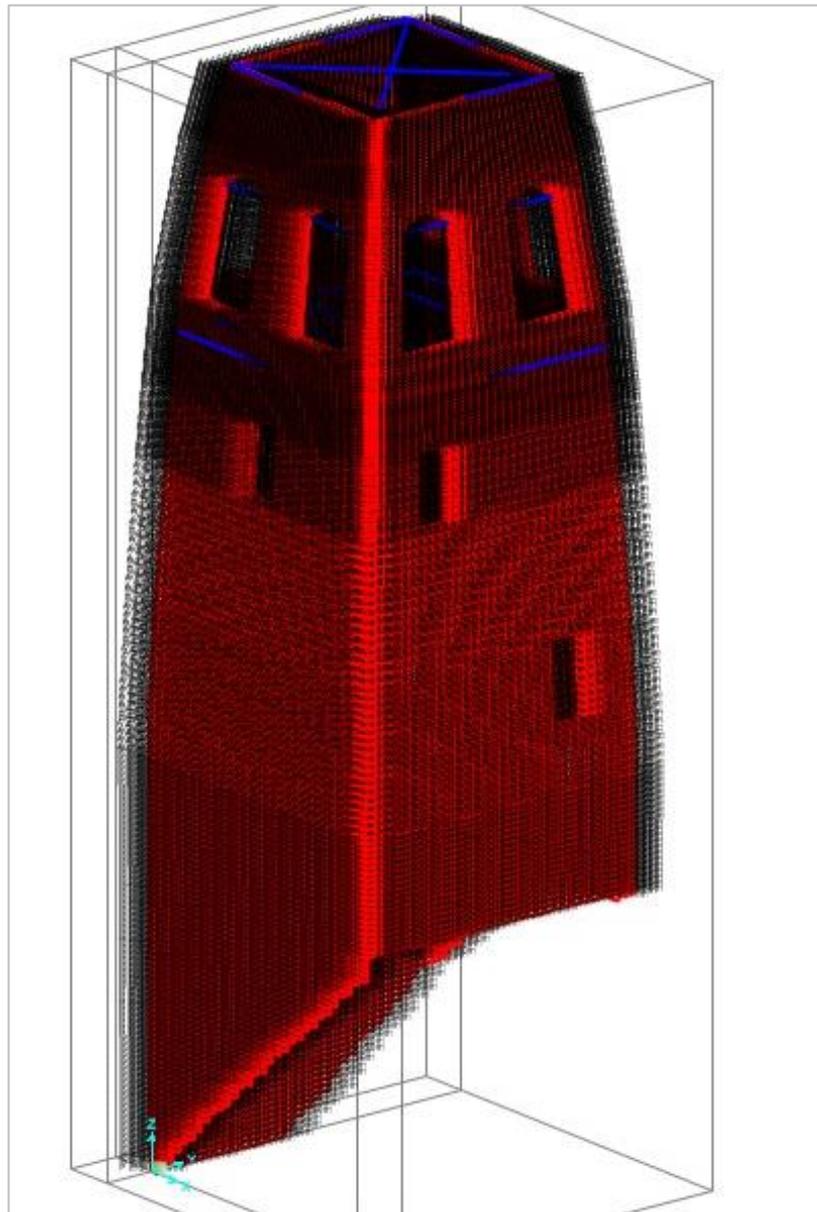


Elaborado por: las autoras

Luego de suprimir los vanos se comenzó la asignación de los elementos Shell y elementos Frame de acuerdo a las secciones y propiedades antes definidas de mampostería de piedra, adobe y madera., así mismo se suprimieron elementos Shell en la parte inferior de la torre de manera que se pueda empotrar al suelo.

Figura 4. 27

Resultado de la Torre Exenta



Nota: Resultado de la Torre Exenta suprimiendo vanos y base de la torre para su empotramiento.

Elaborado por: las autoras

4.4.2.5. Asignación de cargas

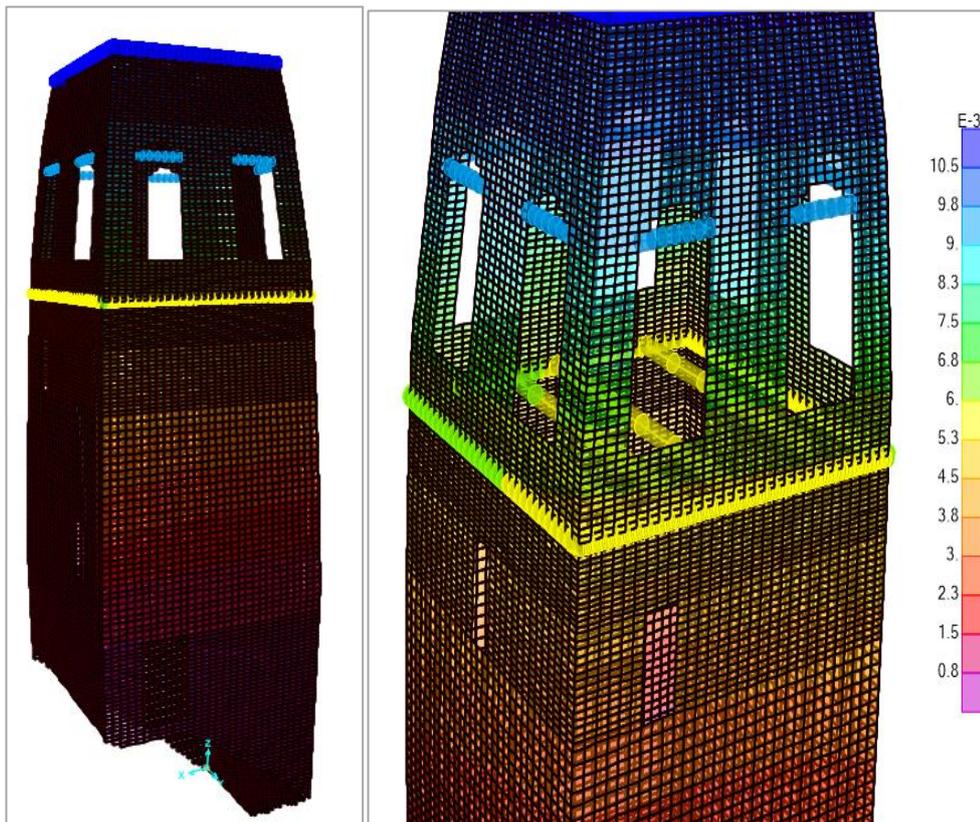
Metrado de Cargas del Techo

Para el metrado de cargas del techo se consideró la norma E.020 del RNE, en el que se establece el peso específico de la madera Tipo B 1000 kg/m³, teja artesanal con un peso específico de 1600kg/m³, obteniéndose un peso total de 4290.41 kg que dividido en una longitud de 12m dan como resultado una carga distribuida de 357.53 kg/m, los cuales actúan directamente en los muros perimétricos, este valor fue asignado en la longitud de cada Frame ubicado en la parte superior de los muros.

Luego de la asignación de materiales, secciones y carga se procedió a correr el software y determinar los desplazamientos de la torre, encontrándose desplazamientos máximos en la parte superior.

Figura 4. 28

Desplazamiento de la Torre Exenta



Elaborado por: las autoras

4.4.2.6. Resultados del análisis modal de la estructura

Tabla 4. 3

Análisis modal de la estructura

Caso de salida	Numero de paso	Periodo s	Frecuencia Hz	UX	UY	UZ	RZ
MODAL	1	0.2468	4.0514	0.2240	0.2850	0.0016	0.0003
MODAL	2	0.2390	4.1831	0.2780	0.2250	0.0007	0.0051
MODAL	3	0.1095	9.1282	0.0006	0.0099	0.0002	0.5390
MODAL	4	0.0926	10.7969	0.0190	0.1640	5.797E-07	0.0100
MODAL	5	0.0914	10.9369	0.1660	0.0160	0.016	0.0039
MODAL	6	0.0757	13.2062	0.0000	0.0047	0.0085	0.0000
MODAL	7	0.0699	14.2873	0.0033	0.0000	0.6340	0.0000
MODAL	8	0.0610	16.3668	0.0003	0.0030	0.0000	0.1410
MODAL	9	0.0514	19.4344	0.0110	0.0035	0.0005	0.0001
MODAL	10	0.0503	19.8661	0.0001	0.0630	0.0000	0.0008

Nota: Obtenida de los resultados de modelo de EF

Elaborado por: las autoras

Obteniendo los siguientes datos:

Desplazamiento en X: TX=0.2390 seg.

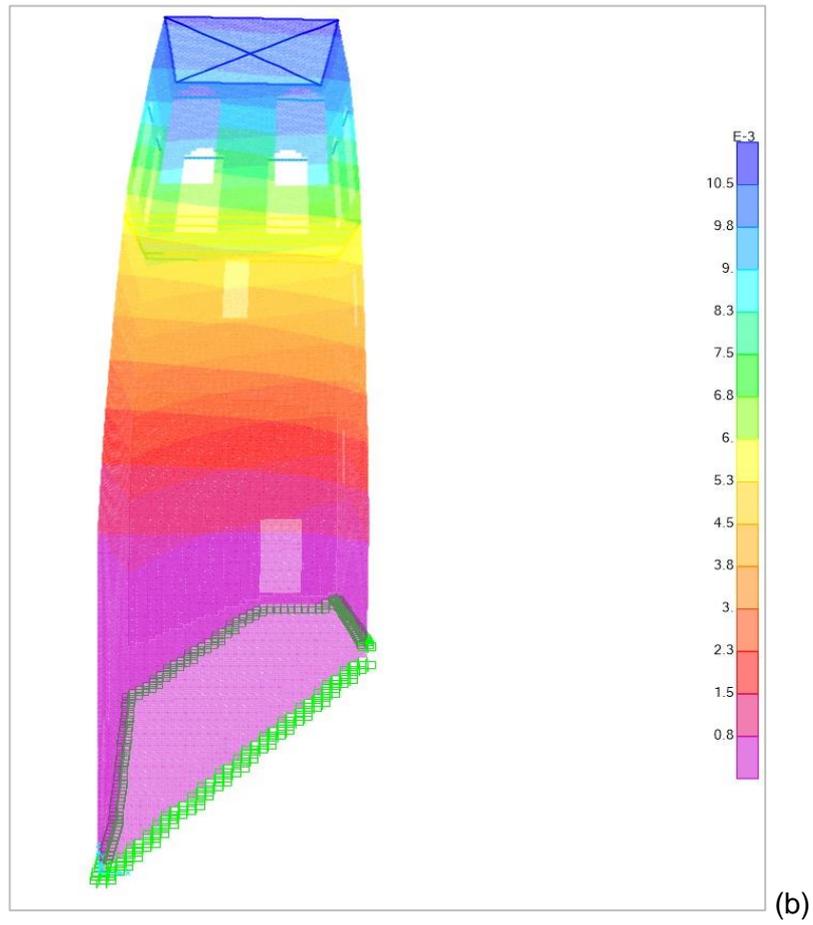
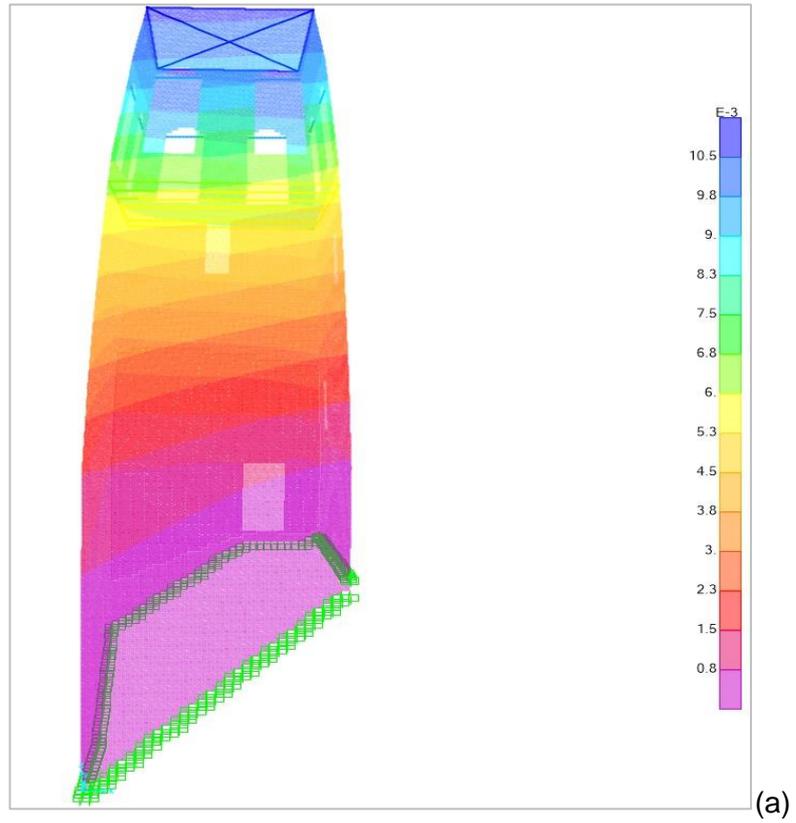
Desplazamiento en Y: TY=0.2468 seg.

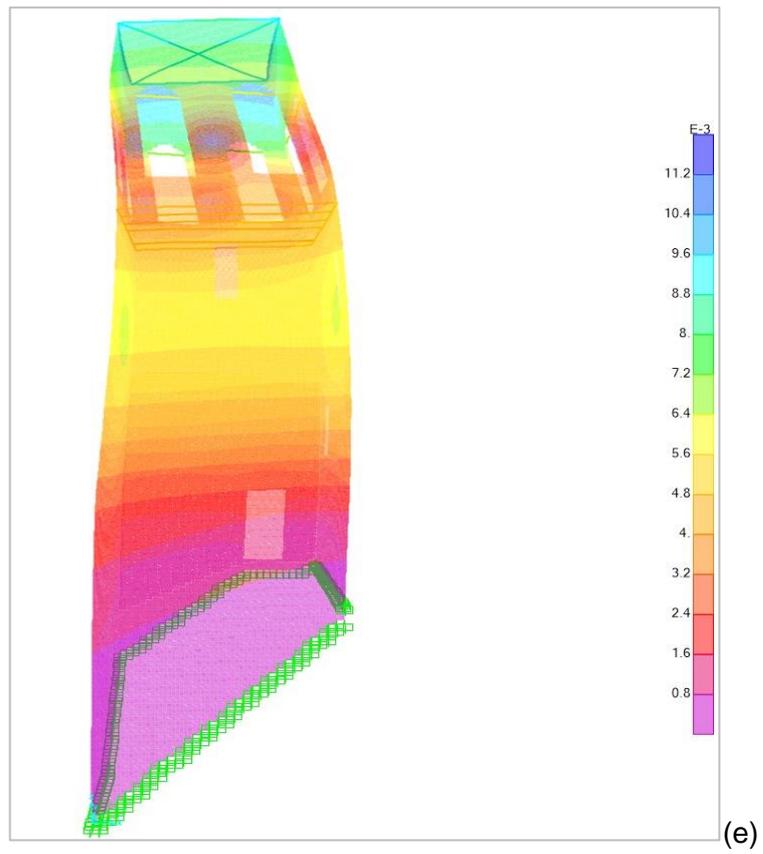
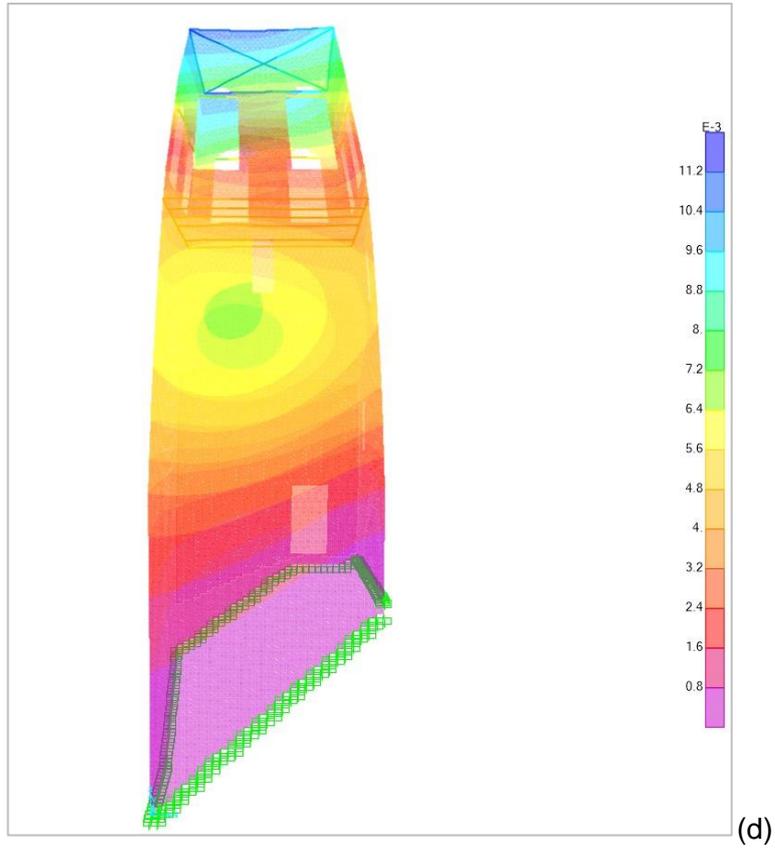
Desplazamiento Rotacional en Z: TRZ=0.1095 seg.

Ahora se exhiben los modos de vibración, comenzando desde el Modo 1 hasta el Modo 5. Estos modos se detallan junto con las formas modales de la estructura, acompañados por su correspondiente patrón de movimiento.

Figura 4. 29

Forma Modal de la Estructura





Nota: a) Modo 1, b) Modo 2, c) Modo 3, d) Modo 4, e) Modo 5.

Elaborado por: las autoras

4.4.2.7. Toma de data de la respuesta de la estructura

La campaña experimental de toma de datos de la respuesta estructural (output) frente a las vibraciones ambientales (input), se desarrollaron basados en los hallazgos encontrados en el modelo de EF, donde se obtuvieron los máximos desplazamientos, de los cuales se obtuvo la ubicación idónea para colocar los transductores y captar las señales de respuesta de la torre.

4.4.2.8. Ubicación de los puntos en el plano

Al realizar una evaluación preliminar de la Torre Exenta se identifica los puntos de mayor interés y vulnerabilidad.

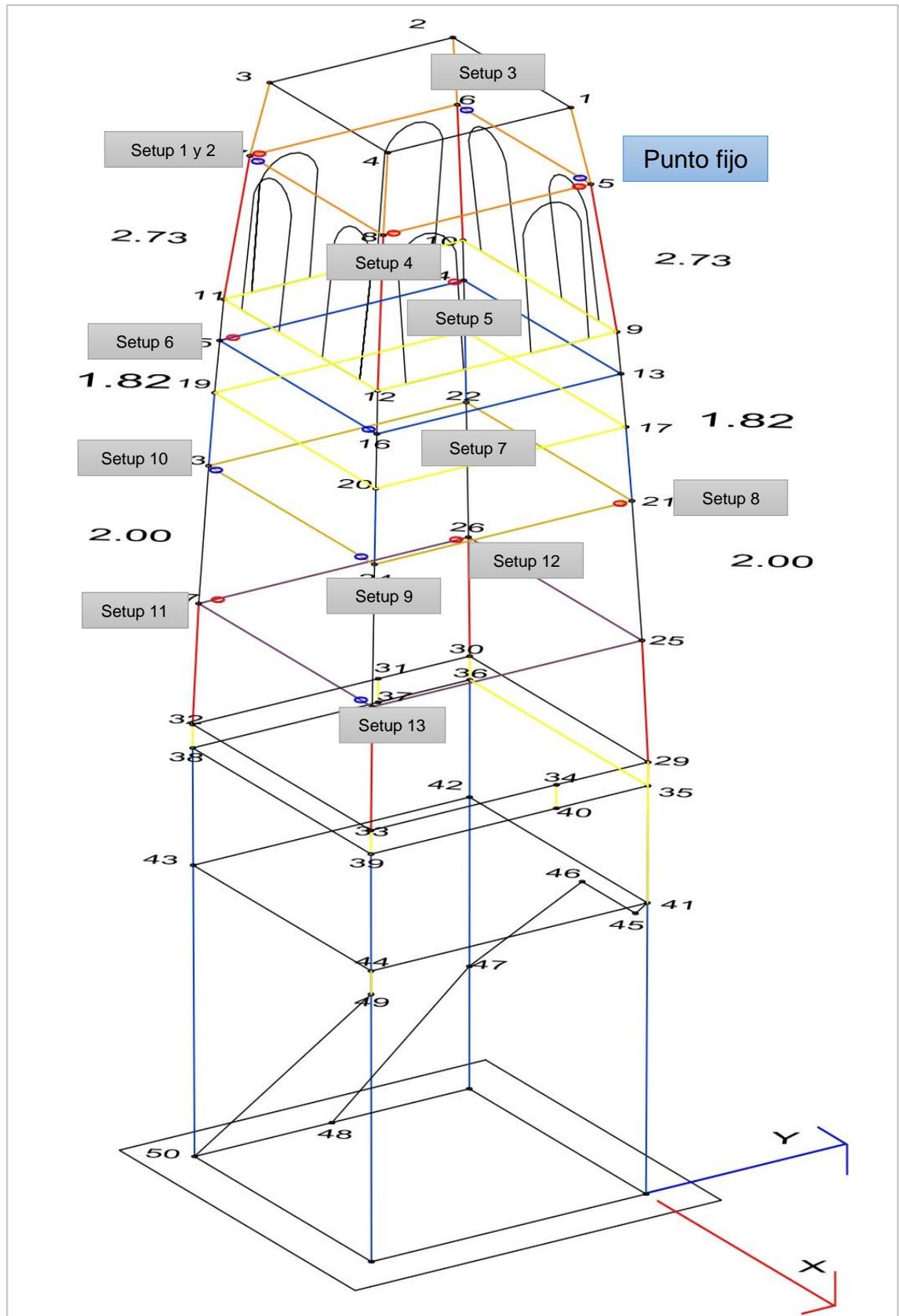
Seleccionamos las ubicaciones adecuadas para los acelerómetros en función de los objetivos del monitoreo y la información obtenida en la evaluación preliminar. Esto incluye puntos clave de la estructura, y áreas sensibles.

Se consultó con expertos en ingeniería estructural y conservación del patrimonio para obtener asesoramiento sobre la colocación de los acelerómetros. Estos expertos nos proporcionaron recomendaciones específicas para minimizar cualquier impacto en la estructura durante la instalación.

Se determinó realizar 13 tomas de datos como se destaca en la Figura 4.27 se referenció la torre en un plano x-y, y cada vértice en un nodo, a partir de ello se ubicaron los acelerómetros en 4 planos horizontales tomando como referencia el entrepiso.

Figura 4. 30

Ubicación de los Puntos en el Plano



Elaborado por: las autoras

4.5. Ensayos de Identificación Modal

El objetivo fue ubicar los puntos de medición en el muro para registrar las vibraciones ambientales. Para determinar los puntos de medición, se utilizaron criterios basados en desplazamientos o amplitudes según el modelo matemático desarrollado. El proceso de medición y adquisición de datos se lleva a cabo, como sigue:

1. Después de marcar el punto de referencia y los puntos móviles, se procede a instalar los acelerómetros en la superficie del muro utilizando limpia tipos que proporcionan la fijación necesaria para los sensores.
2. Se coloca dos sensores fijos en el punto 5, mientras que el otro sensor móvil se coloca en los puntos referentes a la configuración específica que se está llevando a cabo.
3. Se realizan las mediciones, registrando los datos durante aproximadamente 10 minutos por cada ensayo. Para este propósito, se utiliza el software Signal Express.
4. Dicho procedimiento se repite sucesivamente hasta completar todas las configuraciones establecidas previamente.

La combinación de los levantamientos geométricos, los modelos matemáticos de EM y los datos recopilados previamente contribuyó a un enfoque integral y riguroso en el desarrollo de la campaña de monitoreo de vibraciones en la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso de Santa Ana.

4.5.1. Replanteo de los puntos de referencia in situ

Se procedió a replantear los puntos en el interior de la torre de acuerdo a la ubicación en el plano y con respecto al entrepiso.

Se prepara las ubicaciones seleccionadas para la colocación de los acelerómetros. Esto implicó la limpieza de la superficie, la eliminación de cualquier revestimiento o pintura que pudo

interferir con la adherencia del acelerómetro y la preparación de una superficie adecuada para la fijación.

Figura 4. 31

Replanteo de Puntos



Elaborado por: las autoras

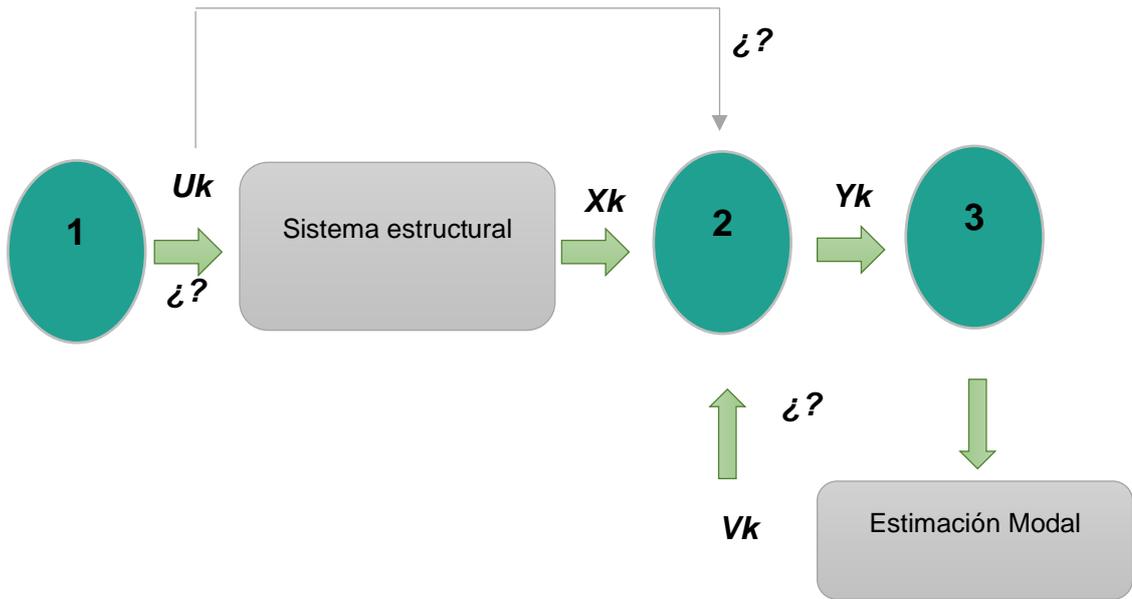
4.5.2. Instalación de los equipos para la toma de data

La caracterización dinámica de una estructura se logra a través de la determinación de sus formas modales, que representan los patrones de vibración natural de la estructura, es decir, las diferentes configuraciones en las que la estructura puede vibrar en respuesta a una excitación o carga dinámica.

De acuerdo a Pachón (2014), la caracterización de una estructura es dinámica y lo hace a través de sus formas modales, coeficiente de amortiguamiento y frecuencias naturales. Por lo que esquematiza la misma de la siguiente manera.

Figura 4. 32

Esquema Explicativo de la Aplicación de OMA



1. Fuente de excitación
2. Equipo de medida
3. Métodos de identificación modal

U_k : Contribución Modal de la fuente de excitación
 X_k : Contribución modal del sistema estructural
 V_k : Contribución modal de fuentes indeseadas
 Y_k : Respuesta estimada por el equipo de medida

Fuente: Pachón, 2014

La estructura se encuentra expuesta a una excitación ambiental cuyos detalles dinámicos no son conocidos, la cual proviene de diversas fuentes como el viento, el tráfico y otros factores. Debido a la naturaleza de los datos obtenidos, la respuesta registrada (Y_k) engloba tanto la influencia del sistema estructural (X_k), la contribución modal de las fuerzas ambientales (U_k) y el ruido no deseado proveniente de otras fuentes (V_k).

Después de llevar a cabo una campaña experimental y recolectar los datos correspondientes, se procede a procesar los registros experimentales utilizando métodos de identificación modal. Estas técnicas de identificación modal son valiosas para separar cada

contribución modal y así determinar los parámetros modales específicos de la estructura. En esencia, permiten discernir y aislar la parte de la respuesta estructural que se debe a su comportamiento intrínseco (Pachón, 2014).

4.5.2.1. Equipo para la medición durante la campaña experimental

El equipo necesario es el que adquiere y almacena la información tomada en cada punto, este equipo lo conforma: los transductores y un sistema de adquisición de datos para procesar la información digital, y también la laptop.

Transductores de respuesta

Los acelerómetros son un tipo de transductor de respuesta utilizado para medir la aceleración de una estructura en respuesta a una excitación o vibraciones ambientales, son fundamentales en la evaluación y el monitoreo de la respuesta estructural y la detección de vibraciones no deseadas en diversas aplicaciones.

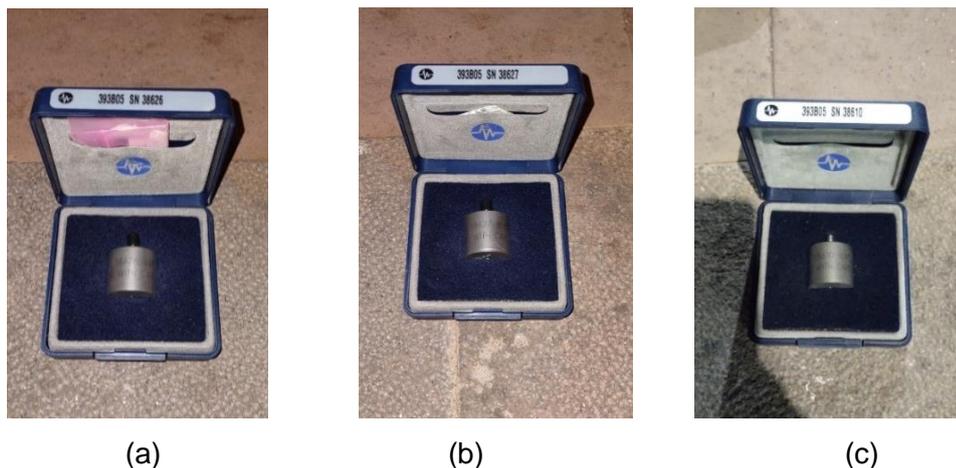
Los sensores utilizados en el estudio son dispositivos altamente sensibles que convierten las magnitudes físicas (aceleraciones, desplazamientos, velocidades, deformaciones, etc.) generadas por la respuesta estructural en señales eléctricas. Estas señales son luego procesadas por un sistema de adquisición de datos.

En este estudio en particular, se midieron las aceleraciones utilizando transductores acelerométricos, ya que son especialmente adecuados para capturar los rangos de frecuencia típicos de las estructuras arquitectónicas.

Se llevaron a cabo un total de 13 configuraciones o preparaciones de ensayos, donde se utilizaron un total de 3 acelerómetros: dos de ellos fueron fijos y uno fue móvil.

Figura 4. 33

Acelerómetros



Nota: a) Serie 38626, b) Serie 38627, c) Serie 38610.

Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 4

Especificaciones de los Transductores

Modelo	Serie	Sensibilidad	
		V/g	V/m/s ²
393B05	38626	10.13	1.033
393B05	38627	10.19	1.039
393B05	38610	10.28	1.049

Nota: Las especificaciones técnicas de los instrumentos.

Elaborado por: las autoras

Sistema de adquisición de datos

(DAQ)

DAQ (Data Acquisition) es el término utilizado para referirse a la adquisición de datos de diferentes sensores y dispositivos de medición en tiempo real. Es un proceso mediante el cual se capturan y registran datos de diferentes fuentes como acelerómetros, para su posterior análisis y procesamiento.

El data logger registra las señales de respuesta de la estructura en tiempo real, cuenta con 6 canales de adquisición de datos, cada uno de ellos para alimentar a cada acelerómetro, durante la campaña experimental se utilizaron los canales 0, 3 y 2; los dos primeros para los acelerómetros fijos y el tercero para el acelerómetro móvil.

Figura 4. 34
Data Logger



Elaborado por: las autoras

Los acelerómetros están instalados a la Data logger y éste al computador, el registro de los datos se realizó con el software Signal Express.

Figura 4. 35
Data Logger



(a)

(b)

Nota: (a) Instalación de la data logger al computador, (b) software utilizado para el registro de datos.

Elaborado por: las autoras

4.5.3. Colocación de los acelerómetros en los puntos replanteados

La colocación de los acelerómetros en los puntos replanteados fue paso crucial en el proceso de monitoreo estructural. Una vez que las superficies de montaje estaban listas, los acelerómetros se adhieren a los puntos replanteados utilizando un adhesivo adecuado. Durante la colocación de los acelerómetros, fue fundamental asegurarnos de que estén correctamente orientados y alineados.

4.5.3.1. Colocación de los transductores fijos en x-y

A continuación, se muestra la colocación de los acelerómetros fijos en el nodo 1 de la torre exenta, éstas correctamente adheridas al muro, como se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 4. 36

Acelerómetros Fijos en x-y



Elaborado por: las autoras

4.5.3.2. Colocación de los transductores móviles en x-y Setup 1

Figura 4. 37

Acelerómetro Móvil en Nodo 7.



Elaborado por: las autoras

La dirección de los acelerómetros fijos permanece constante durante la toma de todos los Setup, cambia únicamente la dirección del acelerómetro móvil, tal como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4. 5

Descripción del Setup 1

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s ²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	7	X	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 38 *Registro de Datos Setup 1 – Duración 10 min.*



Elaborado por: las autoras

Setup 2

Figura 4. 39

Acelerómetro Móvil en Nodo 7



Elaborado por: las autoras

La dirección de los acelerómetros fijos continúa constante durante la toma de todos los Setup, cambia únicamente la dirección del acelerómetro móvil, tal como se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4. 6

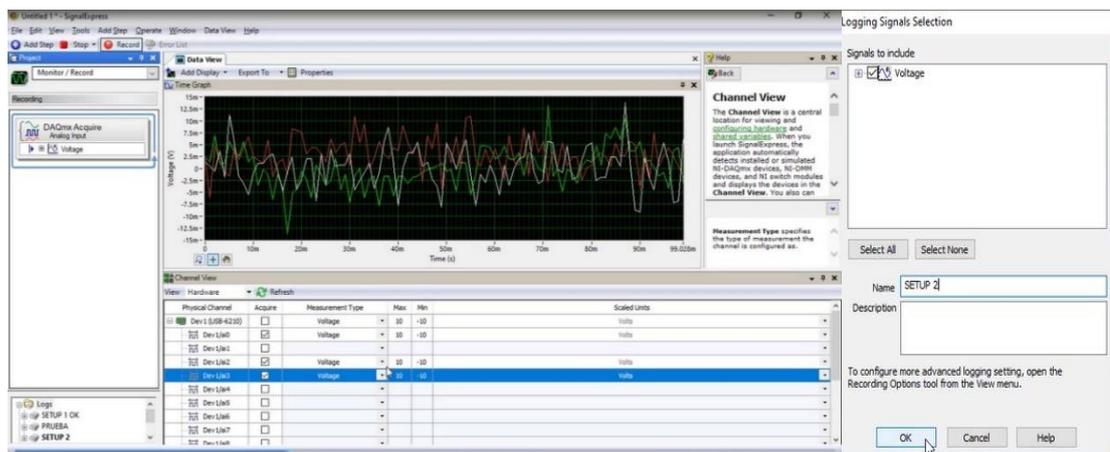
Descripción del Setup 2

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s ²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	7	Y	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 40

Registro de Datos Setup 2 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 3

Figura 4. 41

Acelerómetro Móvil en Nodo 6



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 7

Descripción del Setup 3

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad
					V/m/s²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	6	- Y	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 42

Registro de Datos Setup 3 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 4

Figura 4. 43

Acelerómetro Móvil en Nodo 8



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 8

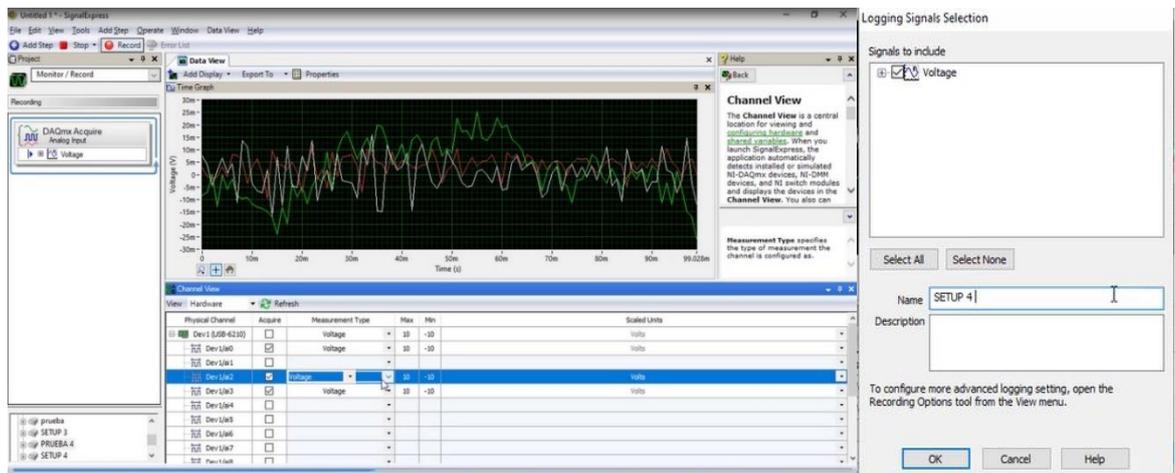
Descripción del Setup 4

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	Nº	Sensibilidad
					V/m/s²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	8	- X	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 44

Registro de Datos Setup 4 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 5

Figura 4. 45

Acelerómetro Móvil en Nodo 14



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 9

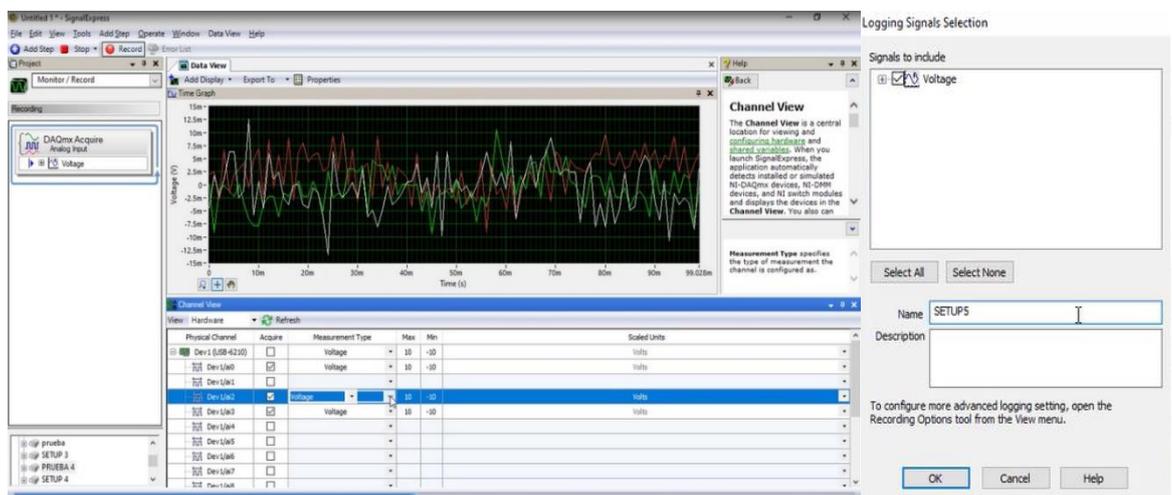
Descripción del Setup 5

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	14	X	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 46

Registro de Datos Setup 5 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 6

Figura 4. 47

Acelerómetro Móvil en Nodo 15



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 10

Descripción del Setup 6

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad
					V/m/s ²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	15	X	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 48

Registro de Datos Setup 6 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 7

Figura 4. 49

Acelerómetro Móvil en Nodo 16



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 11

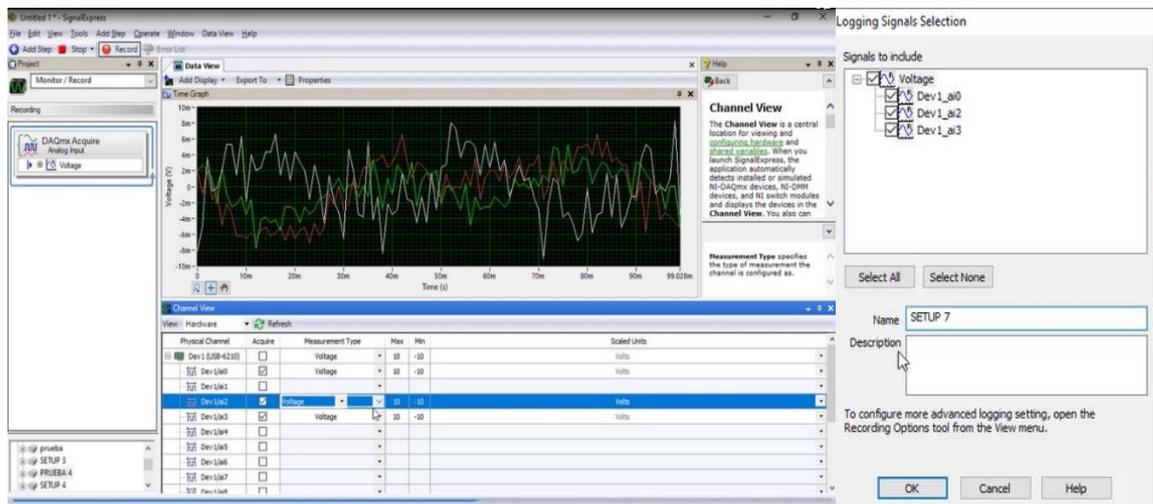
Descripción del Setup 7

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s ²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	16	Y	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 50

Registro de Datos Setup 7 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 8

Figura 4. 51

Acelerómetro Móvil en Nodo 21



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 12

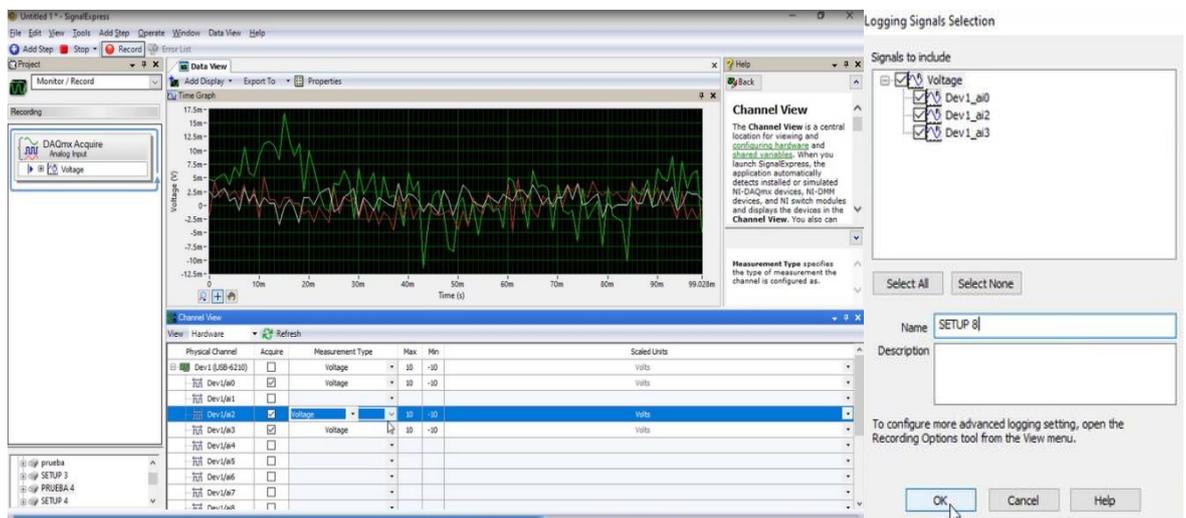
Descripción del Setup 8

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad
					V/m/s ²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	21	- X	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 52

Registro de Datos Setup 8 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 9

Figura 4. 53

Acelerómetro Móvil en Nodo 24



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 13

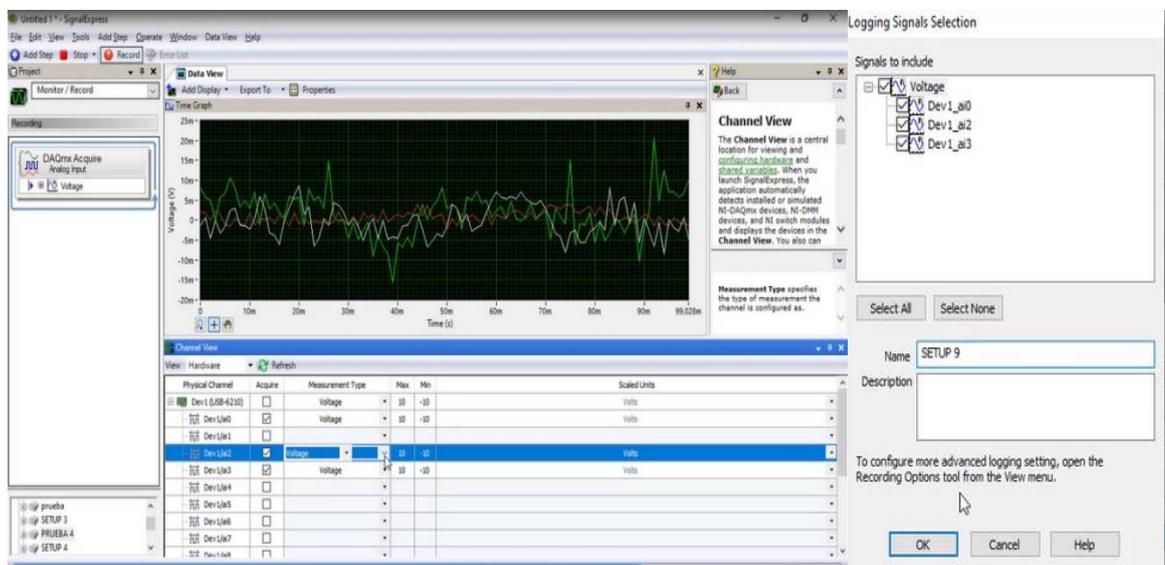
Descripción del Setup 9

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	24	Y	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 54

Registro de Datos Setup 9 – Duración 10 min



Elaborado por: las autoras

Setup 10

Figura 4. 55

Acelerómetro Móvil en Nodo 23



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 14

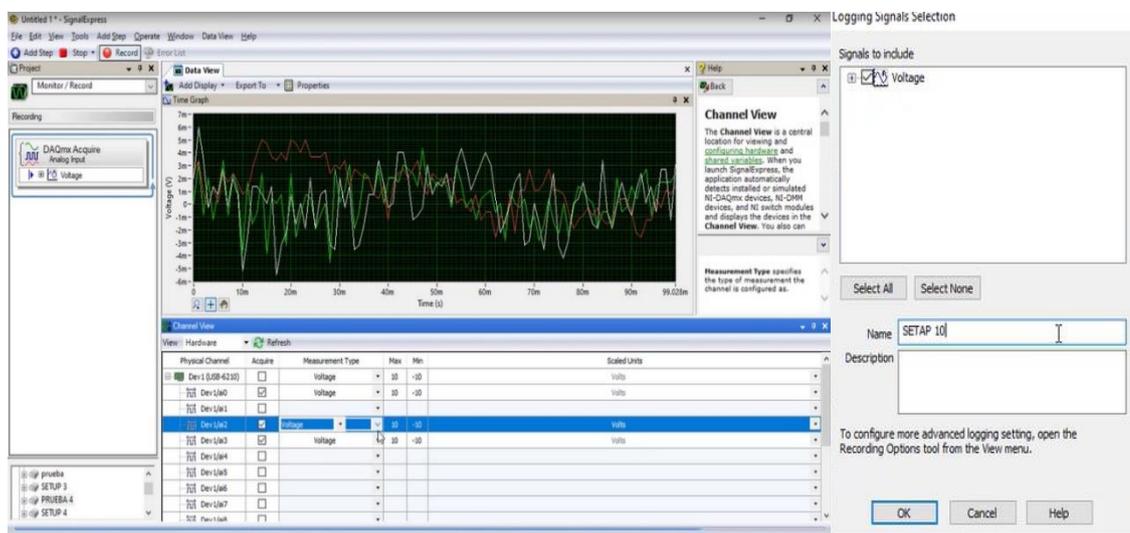
Descripción del Setup 10

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s ²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	23	Y	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 56

Registro de Datos Setup 10 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 11

Figura 4. 57

Acelerómetro Móvil en Nodo 27



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 15

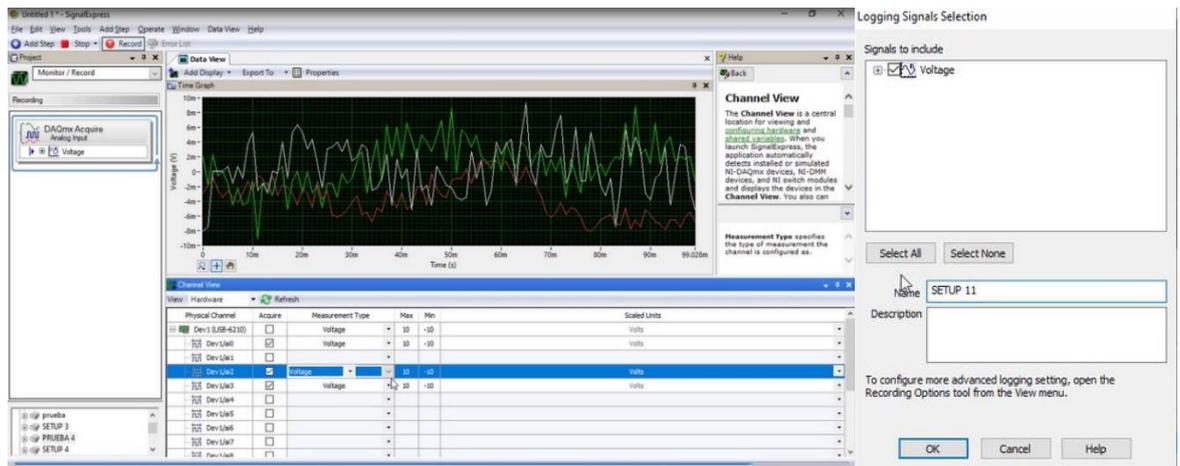
Descripción del Setup 11

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad
					V/m/s²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	27	X	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 58

Registro de Datos Setup 11 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Setup 12

Figura 4. 59

Acelerómetro Móvil en Nodo 26



Elaborado por: las autoras

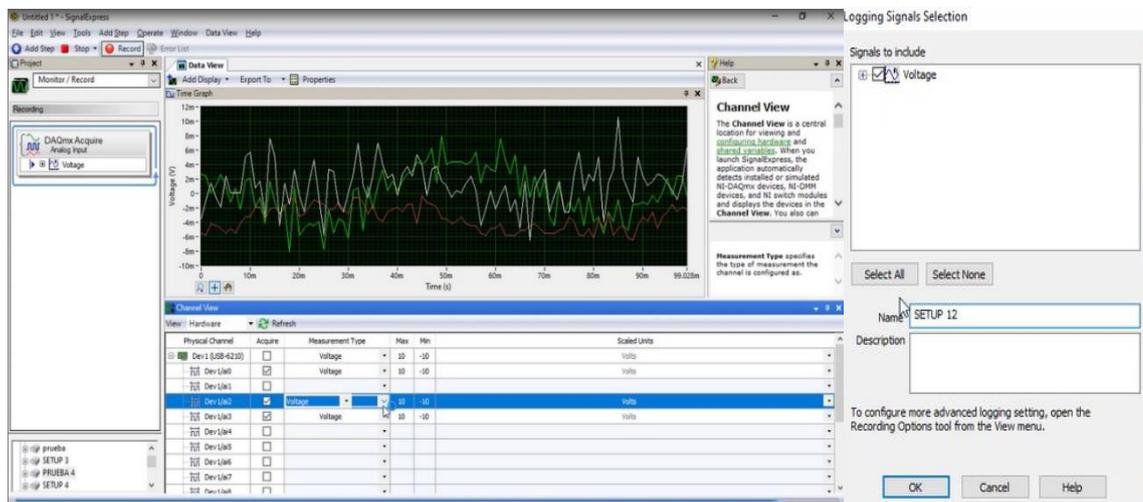
Tabla 4. 16

Descripción del Setup 12

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	26	X	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 60 *Registro de datos Setup 12 – duración 10 min.*



Elaborado por: las autoras

Setup 13

Figura 4. 61

Acelerómetro Móvil en Nodo 28



Elaborado por: las autoras

Tabla 4. 17

Descripción del Setup 13

Acelerómetro	Nodo	Dirección	Channel	N°	Sensibilidad V/m/s ²
Fijo	5	- X	0	38626	1.033
Fijo	5	- Y	3	38627	1.039
Móvil	28	Y	2	38610	1.049

Elaborado por: las autoras

Figura 4. 62

Registro de Datos Setup 13 – Duración 10 min.



Elaborado por: las autoras

Tabla resumen de nodos registrados – ARTEMIS Modal PRO

Tabla 4. 18

Coordenadas de Nodos Geométricos y de Medida

Nodo	x	y	z	Nodo	x	y	z	Nodo	x	y	z
1	3.750	3.750	15.580	71	3.759	4.513	4.2	141	0.498	0.498	14.08
2	0.750	3.750	15.580	72	3.763	4.519	5.89	142	1.003	0.55	14.5
3	0.750	0.750	15.580	73	2.855	4.519	5.89	143	0.978	0.515	14.22
4	3.750	0.750	15.580	74	2.854	4.513	4.2	144	1.23	0.55	14.5
5	3.950	3.950	14.500	75	3.687	4.21	12.4	145	1.57	0.55	14.5
6	0.550	3.950	14.500	76	3.535	4.002	14.08	146	1.797	0.55	14.5
7	0.550	0.550	14.500	77	3.291	3.985	14.22	147	1.787	0.515	14.22
8	3.950	0.550	14.500	78	2.944	3.985	14.22	148	2.703	0.55	14.5
9	4.210	4.210	12.400	79	2.717	4.002	14.08	149	2.713	0.515	14.22
10	0.290	4.210	12.400	80	2.773	4.21	12.4	150	2.93	0.55	14.5
11	0.29	0.29	12.4	81	1.727	4.21	12.4	151	3.27	0.55	14.5
12	4.210	0.290	12.400	82	1.783	4.002	14.08	152	3.522	0.515	14.22
13	4.250	4.250	11.801	83	1.556	3.985	14.22	153	3.497	0.55	14.5
14	0.250	4.250	11.801	84	1.209	3.985	14.22	154	4.002	0.498	14.08
15	0.2503	0.2503	11.8006	85	0.965	4.002	14.08	155	3.95	1.003	14.5
16	4.2497	0.2503	11.8006	86	0.813	4.21	12.4	156	3.985	0.978	14.22
17	4.3	4.3	11.04	87	0.29	3.687	12.4	157	3.95	1.23	14.5
18	0.2	4.3	11.04	88	0.498	3.535	14.08	158	3.95	1.57	14.5
19	0.2	0.2	11.04	89	0.515	3.291	14.22	159	3.95	1.797	14.5
20	4.3	0.2	11.04	90	0.515	2.944	14.22	160	3.985	1.787	14.22
21	4.36	4.36	9.98	91	0.498	2.717	14.08	161	3.95	2.703	14.5
22	0.140	4.360	9.980	92	0.29	2.773	12.4	162	3.985	2.713	14.22
23	0.14	0.14	9.98	93	0.29	1.727	12.4	163	3.95	2.93	14.5
24	4.360	0.140	9.980	94	0.498	1.783	14.08	164	3.95	3.27	14.5
25	4.460	4.460	7.980	95	0.515	1.556	14.22	165	3.985	3.522	14.22
26	0.040	4.460	7.980	96	0.515	1.209	14.22	166	3.95	3.497	14.5
27	0.040	0.040	7.980	97	0.498	0.965	14.08	167	3.35	3.75	15.58
28	4.46	0.04	7.98	98	0.29	0.813	12.4	168	3.15	3.75	15.58
29	4.52	4.52	6.23	99	0.813	0.29	12.4	169	2.85	3.75	15.58
30	-0.020	4.520	6.230	100	0.965	0.498	14.08	170	2.65	3.75	15.58
31	-0.020	3.020	6.230	101	1.209	0.515	14.22	171	1.85	3.75	15.58
32	-0.020	-0.020	6.230	102	1.559	0.515	14.22	172	1.65	3.75	15.58
33	4.520	-0.020	6.230	103	1.783	0.498	14.08	173	1.35	3.75	15.58
34	4.520	3.020	6.230	104	1.727	0.29	12.4	174	1.15	3.75	15.58
35	4.519	4.519	5.890	105	2.773	0.29	12.4	175	0.75	3.35	15.58
36	-0.019	4.519	5.890	106	2.717	0.498	14.08	176	0.75	3.15	15.58
37	-0.019	3.019	5.890	107	2.944	0.515	14.22	177	0.75	2.85	15.58
38	-0.019	-0.019	5.890	108	3.291	0.515	14.22	178	0.75	2.65	15.58
39	4.519	-0.019	5.890	109	3.535	0.498	14.08	179	0.75	1.85	15.58
40	4.5189	3.0189	5.89	110	3.687	0.29	12.4	180	0.75	1.65	15.58
41	4.5135	4.5135	4.2	111	1.969	0.14	9.98	181	0.75	1.35	15.58
42	-0.014	4.514	4.200	112	1.977	0.2	11.04	182	0.75	1.15	15.58
43	-0.014	-0.014	4.200	113	2.387	0.2	11.04	183	1.15	0.75	15.58
44	4.514	-0.014	4.200	114	2.391	0.14	9.98	184	1.35	0.75	15.58
45	4.211	4.513	3.948	115	4.002	4.002	14.08	185	1.65	0.75	15.58
46	2.853	4.513	3.948	116	3.497	3.95	14.5	186	1.85	0.75	15.58
47	-0.006	4.506	1.764	117	3.522	3.985	14.22	187	2.65	0.75	15.58
48	0.000	2.250	0.000	118	3.27	3.95	14.5	188	2.85	0.75	15.58
49	4.513	-0.013	3.864	119	2.93	3.95	14.5	189	3.15	0.75	15.58
50	0.000	0.000	0.000	120	2.703	3.95	14.5	190	3.35	0.75	15.58
51	4.500	3.150	6.813	121	2.713	3.985	14.22	191	3.75	1.15	15.58
52	4.5	3.6	6.813	122	1.797	3.95	14.5	192	3.75	1.35	15.58
53	4.46	3.134	7.98	123	1.787	3.985	14.22	193	3.75	1.65	15.58
54	4.46	3.576	7.98	124	1.57	3.95	14.5	194	3.75	1.85	15.58
55	4.36	0.984	9.98	125	1.23	3.95	14.5	195	3.75	2.65	15.58
56	4.36	1.406	9.98	126	0.978	3.985	14.22	196	3.75	2.85	15.58
57	4.3	1.02	11.04	127	1.003	3.95	14.5	197	3.75	3.15	15.58
58	4.3	1.43	11.04	128	0.498	4.002	14.08	198	3.75	3.35	15.58
59	4.21	0.813	12.4	129	0.55	3.497	14.5	199	3.716	4.25	11.801
60	4.002	0.965	14.08	130	0.515	3.522	14.22	200	2.783	4.25	11.801
61	3.985	1.209	14.22	131	0.55	3.27	14.5	201	1.717	4.25	11.801
62	3.985	1.556	14.22	132	0.55	2.93	14.5	202	0.784	4.25	11.801
63	4.002	1.783	14.08	133	0.55	2.703	14.5	203	3.753	4.3	11.04
64	4.21	1.727	12.4	134	0.515	2.713	14.22	204	2.797	4.3	11.04
65	4.21	2.773	12.4	135	0.55	1.797	14.5	205	1.703	4.3	11.04
66	4.002	2.717	14.08	136	0.515	1.787	14.22	206	0.747	4.3	11.04
67	3.985	2.944	14.22	137	0.55	1.57	14.5	207	3.797	4.36	9.98
68	3.985	3.291	14.22	138	0.55	1.23	14.5	208	2.813	4.36	9.98
69	4.002	3.535	14.08	139	0.515	0.978	14.22	209	1.687	4.36	9.98
70	4.21	3.687	12.4	140	0.55	1.003	14.5	210	0.703	4.36	9.98

Nodo	x	y	z	Nodo	x	y	z
211	3.871	4.46	7.98	260	3.753	0.2	11.04
212	2.839	4.46	7.98	261	0.703	0.14	9.98
213	1.661	4.46	7.98	262	1.687	0.14	9.98
214	0.629	4.46	7.98	263	2.813	0.14	9.98
215	3.915	4.52	6.23	264	3.797	0.14	9.98
216	2.855	4.52	6.23	265	0.629	0.04	7.98
217	1.645	4.52	6.23	266	1.661	0.04	7.98
218	0.585	4.52	6.23	267	2.839	0.04	7.98
219	3.914	4.519	5.89	268	3.871	0.04	7.98
220	1.645	4.519	5.89	269	0.585	-0.02	6.23
221	0.586	4.519	5.89	270	1.645	-0.02	6.23
222	3.91	4.513	4.2	271	2.855	-0.02	6.23
223	1.646	4.513	4.2	272	3.915	-0.02	6.23
224	0.59	4.513	4.2	273	0.586	-0.019	5.89
225	0.25	3.716	11.801	274	1.645	-0.019	5.89
226	0.25	2.783	11.801	275	2.855	-0.019	5.89
227	0.25	1.717	11.801	276	3.914	-0.019	5.89
228	0.25	0.784	11.801	277	0.59	-0.013	4.2
229	0.2	3.753	11.04	278	1.797	-0.013	4.2
230	0.2	2.797	11.04	279	2.854	-0.013	4.2
231	0.2	1.703	11.04	280	3.91	-0.013	4.2
232	0.2	0.747	11.04	281	4.25	0.784	11.801
233	0.14	3.797	9.98	282	4.25	1.717	11.801
234	0.14	2.813	9.98	283	4.25	2.783	11.801
235	0.14	1.687	9.98	284	4.25	3.716	11.801
236	0.14	0.703	9.98	285	4.3	0.747	11.04
237	0.04	3.871	7.98	286	4.3	1.703	11.04
238	0.04	2.839	7.98	287	4.3	2.797	11.04
239	0.04	1.661	7.98	288	4.3	3.753	11.04
240	0.04	0.629	7.98	289	4.36	0.703	9.98
241	-0.02	3.915	6.23	290	4.36	1.828	9.98
242	-0.02	2.855	6.23	291	4.36	2.813	9.98
243	-0.02	1.645	6.23	292	4.36	3.797	9.98
244	-0.02	0.585	6.23	293	4.46	0.629	7.98
245	-0.019	3.914	5.89	294	4.46	1.661	7.98
246	-0.019	2.855	5.89	295	4.46	2.839	7.98
247	-0.019	1.645	5.89	296	4.46	3.871	7.98
248	-0.019	0.586	5.89	297	4.52	0.585	6.23
249	-0.019	3.914	4.2	298	4.52	1.645	6.23
250	-0.019	2.855	4.2	299	4.52	2.855	6.23
251	-0.019	0.586	4.2	300	4.52	3.915	6.23
252	-0.019	1.645	4.2	301	4.519	0.586	5.89
253	0.784	0.25	11.801	302	4.519	1.645	5.89
254	1.717	0.25	11.801	303	4.519	2.855	5.89
255	2.783	0.25	11.801	304	4.519	3.914	5.89
256	3.716	0.25	11.801	305	4.513	0.59	4.2
257	0.747	0.2	11.04	306	4.513	1.646	4.2
258	1.703	0.2	11.04	307	4.513	3.91	4.2
259	2.797	0.2	11.04	308	4.513	2.854	4.2

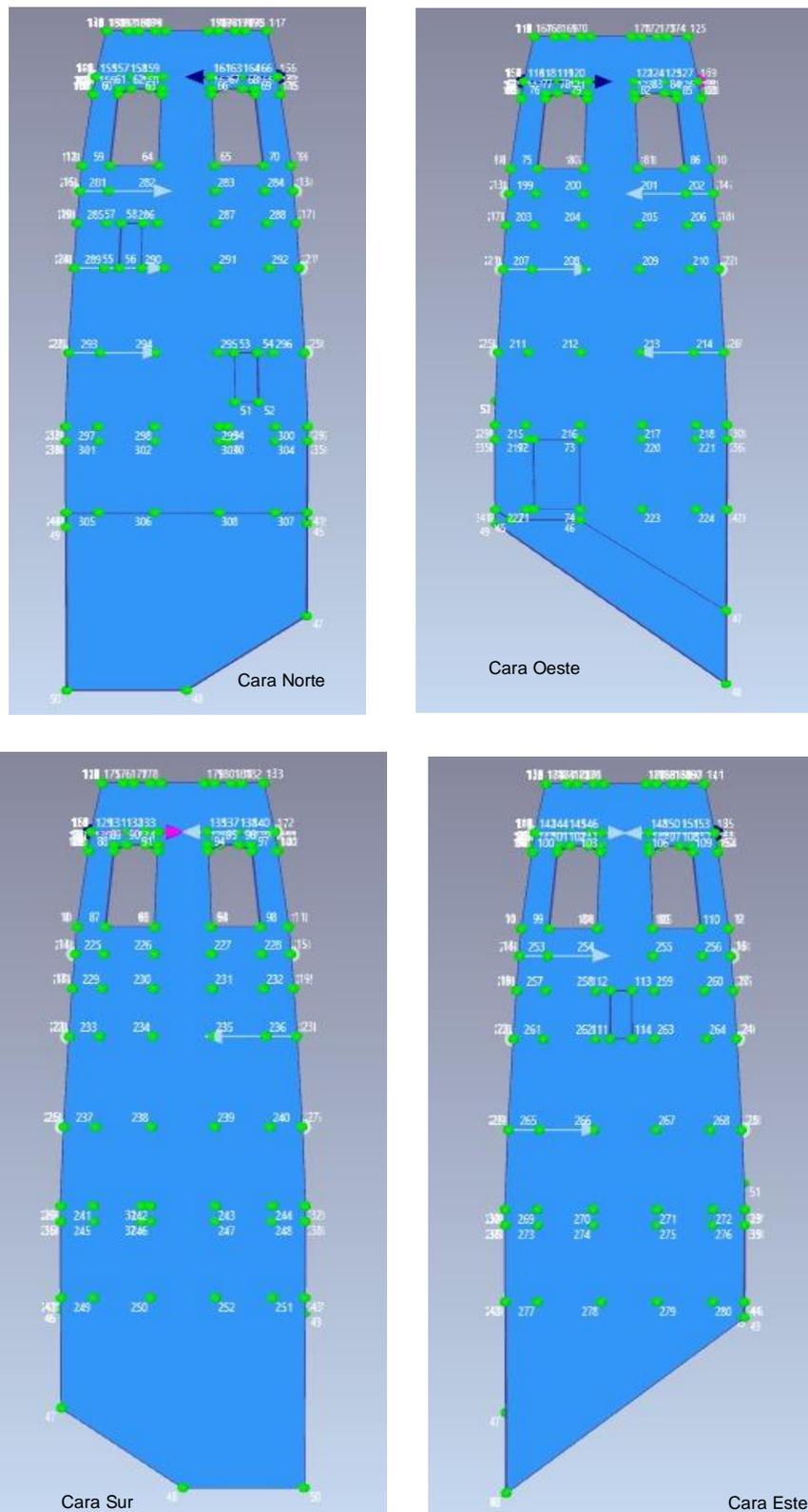
Elaborado por: las autoras

Nodos ubicados en la Torre

Los nodos en la estructura de ARTeMIS son puntos de referencia ubicados para determinar la geometría de la Torre Exenta definiendo formas, vanos, muros, etc.

Figura 4. 63

Nodos y Vectores de Medición – ARTeMIS Modal PRO



Nota: El sensor de referencia se representa en color azul, mientras que los sensores móviles se representan de color rosado.

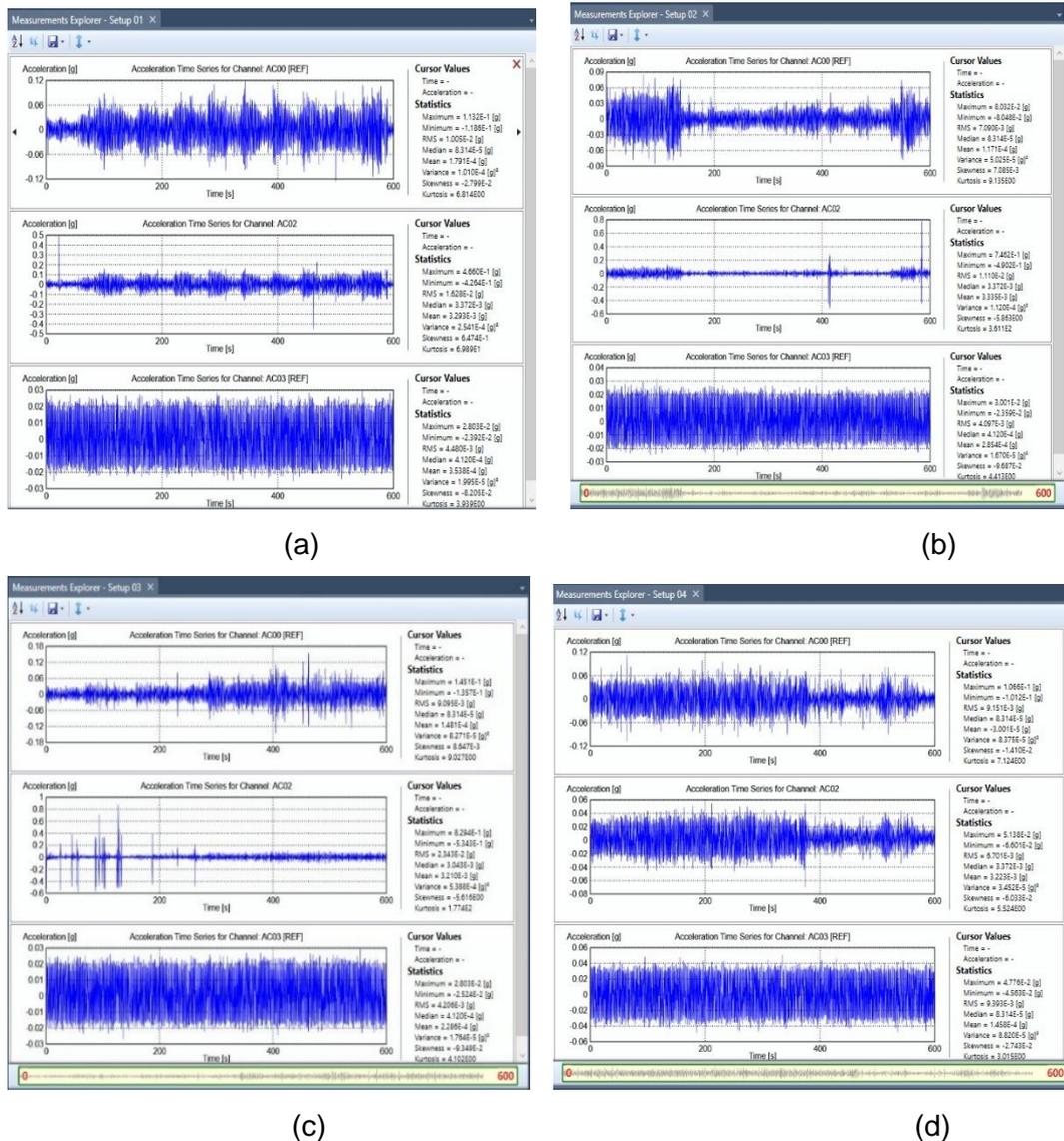
Elaborado por: las autoras

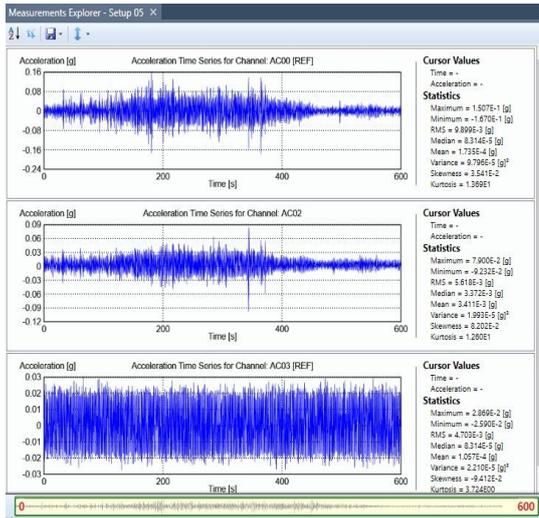
4.5.4. Recolección de datos

Se analizaron y evaluaron utilizando el programa Signal Express. Durante un período de 10 minutos, se realizaron mediciones de aceleración y se registraron las señales correspondientes para cada configuración. Estos registros se presentaron en forma de gráficos que presentan la vinculación entre la aceleración y el tiempo para cada configuración registrada. A continuación, se muestran los gráficos que ilustran estos resultados.

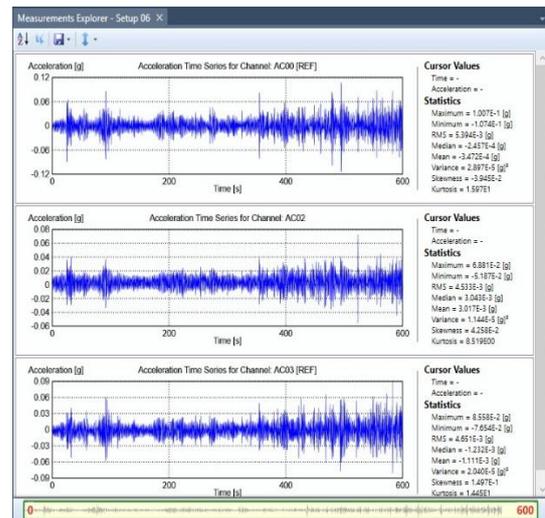
Figura 4. 64

Registro de Aceleración vs Tiempo

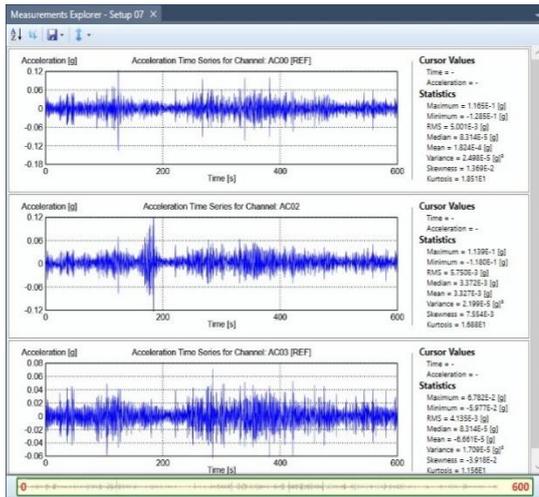




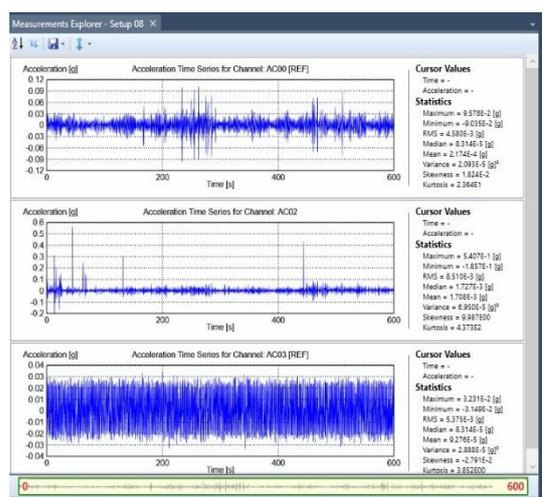
(e)



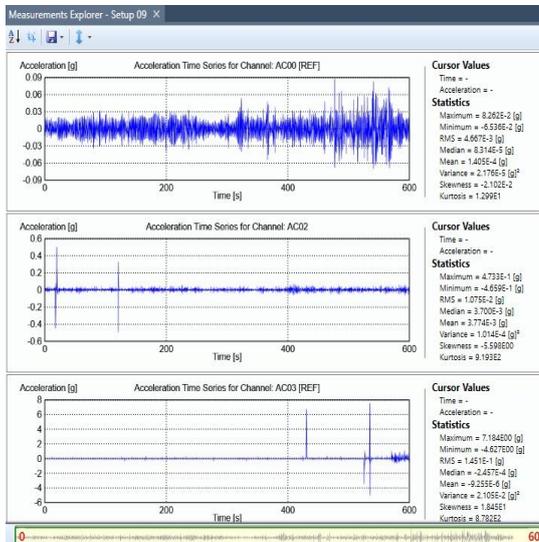
(f)



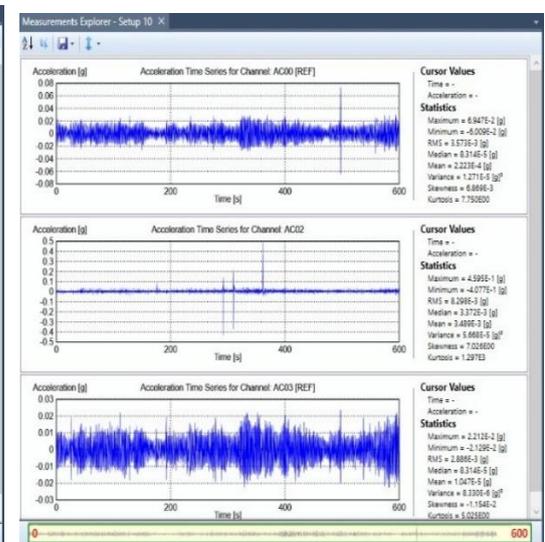
(g)



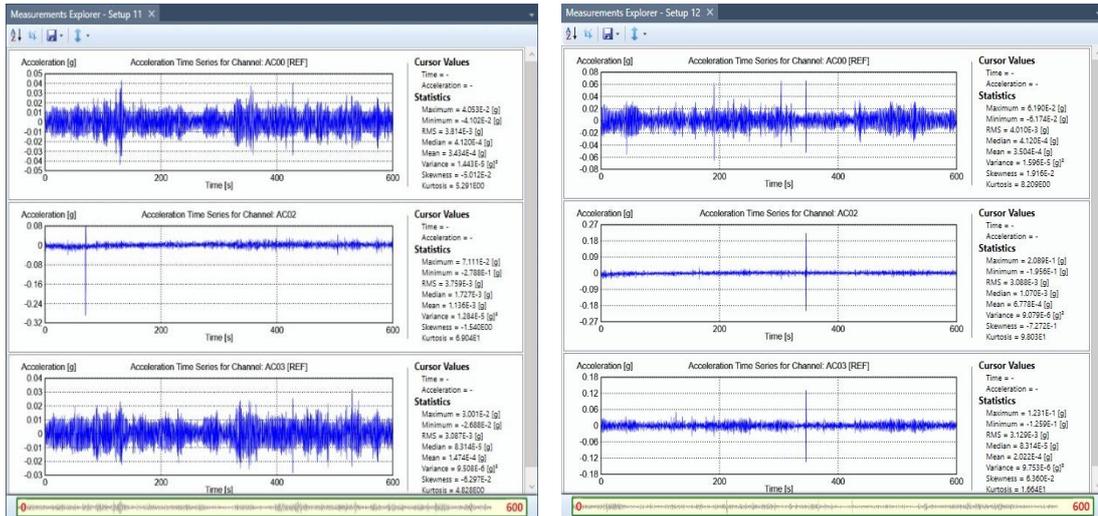
(h)



(i)

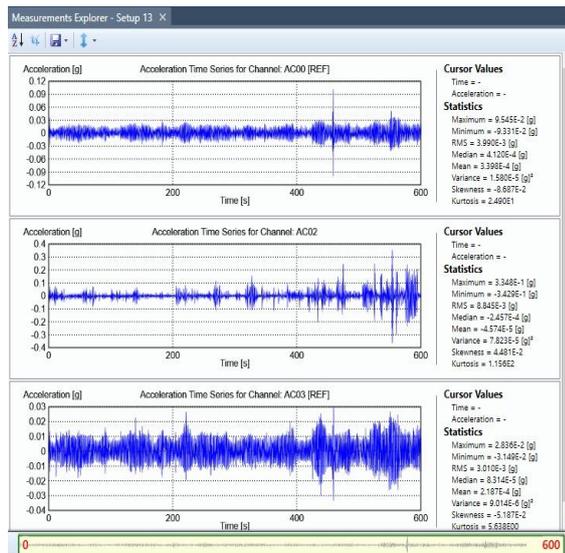


(j)



(k)

(l)



(m)

Nota: Comparativa temporal de registros de aceleración para diferentes configuraciones medidas: a) Configuración 1, b) Configuración 2, c) Configuración 3, d) Configuración 4, e) Configuración 5, f) Configuración 6, g) Configuración 7, h) Configuración 8, i) Configuración 9, j) Configuración 10, k) Configuración 11, l) Configuración 12, m) Configuración 13.

Elaborado por: las autoras

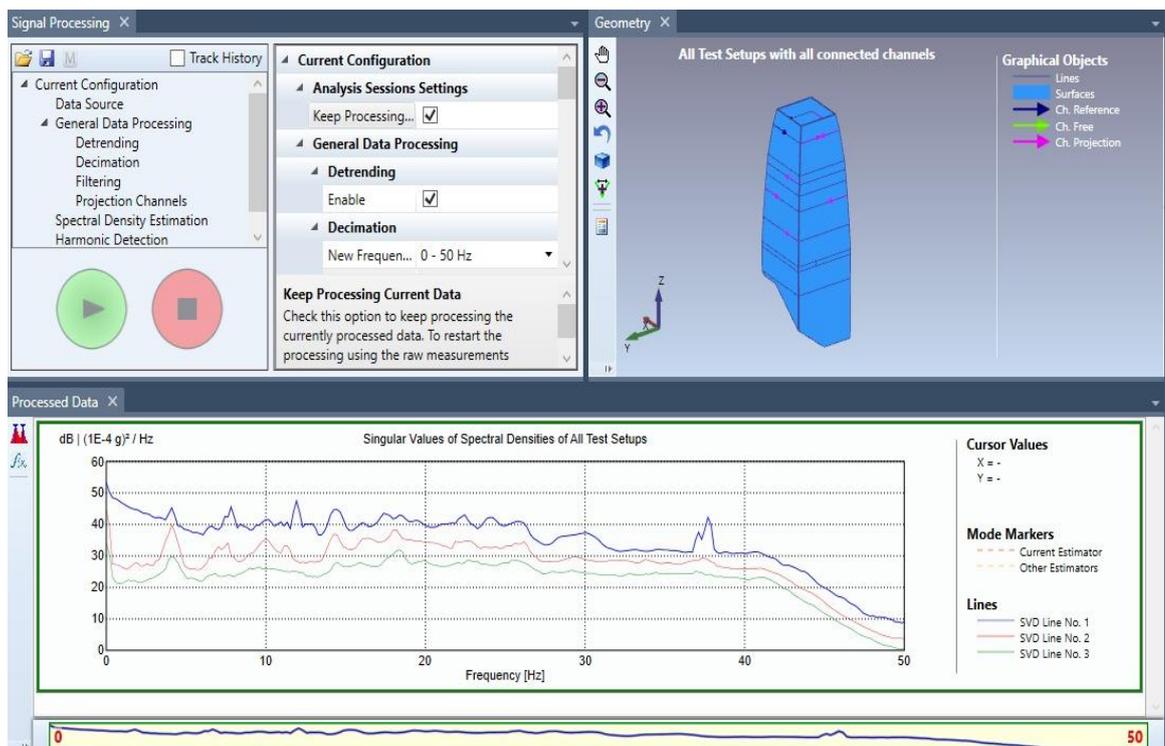
4.5.5. Procesamiento de datos

El proceso de detalle de los parámetros modales se llevó a cabo utilizando el software ARTeMIS Modal Pro (Figura 4.64).

Este software utiliza cuatro técnicas de análisis modal en el dominio de la frecuencia basadas en la tecnología de descomposición en el dominio de la frecuencia (Frequency Domain Decomposition), que se fundamenta en la descomposición de la matriz de funciones de densidad espectral en vectores y valores singulares (Sequera & Solano, 2018).

Figura 4. 65

Transformada de Fourier – Torre Exenta



Nota: Se registra todas las frecuencias de la Torre Exenta.

Elaborado por: las autoras

Las cuatro metodologías empleadas comprenden: la descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD), la versión mejorada de la descomposición en el dominio de la frecuencia (EFDD), la curva de ajuste en la descomposición del dominio de la frecuencia (CFDD) y el método de identificación en el subespacio estocástico (SSI). Estos enfoques se fundamentan en la técnica de selección de picos en el dominio de la frecuencia, que se apoya en la función de respuesta en frecuencia. Consiste en detectar valores elevados alrededor de las

frecuencias naturales, que son identificadas a partir de los picos en la función espectral, puesto que las densidades espectrales representan la distribución de energía de todas las frecuencias. Estas técnicas son desarrolladas en el dominio de la frecuencia y son ampliamente utilizadas debido a su simplicidad y velocidad de procesamiento (Sequera & Solano, 2018).

Según lo expuesto por el investigador Pachón (2014), se sostiene que en cuanto a la confiabilidad de los resultados obtenidos, los métodos de descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFDD) y el método de identificación en el subespacio estocástico (SSI) aplicado en el dominio del tiempo, son considerados más fiables. Por otro lado, se menciona que los métodos en el dominio de la frecuencia son más fáciles y rápidos de procesar.

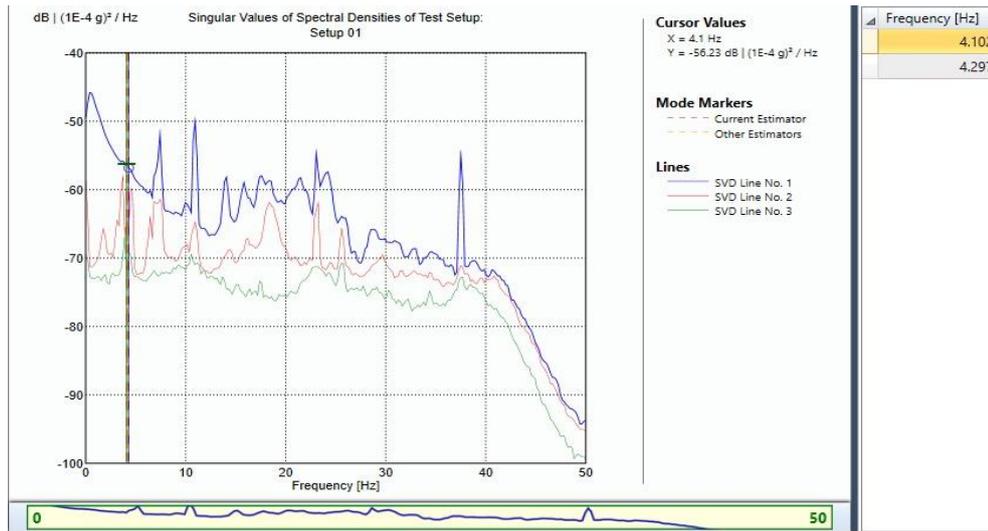
4.5.6. Procesamiento de Identificación Modal

Los datos de las mediciones, que engloban tanto las características geométricas como los registros obtenidos durante la campaña experimental, se introdujeron en archivos de texto en formato plano. Estos archivos se cargaron en el software ARTeMIS Modal Pro para su posterior tratamiento mediante los diversos métodos de identificación modal disponibles.

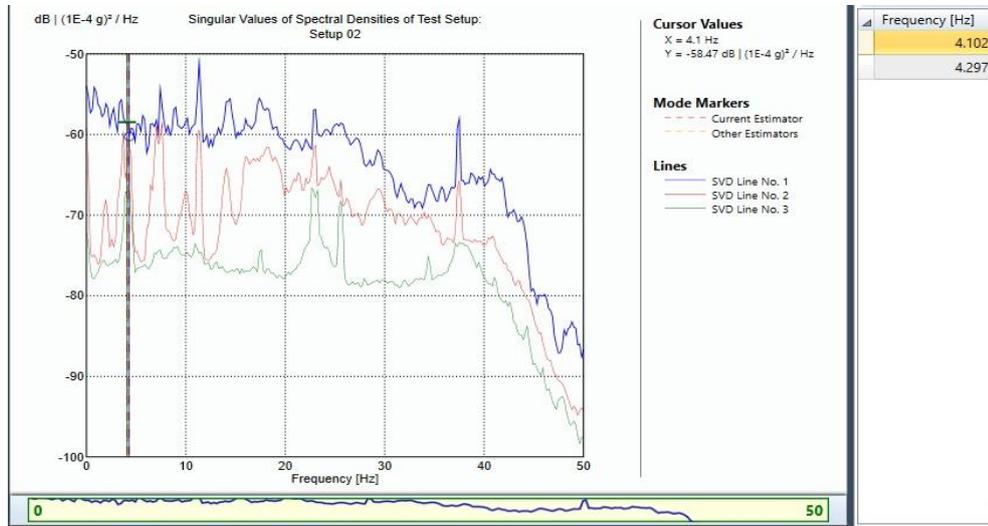
Basándose en esta información, se identificaron los puntos más altos de densidad espectral para cada configuración en particular, los cuales se presentan visualmente en las siguientes representaciones. Estos picos representan las frecuencias naturales de la estructura. Mediante el procesamiento y cálculo de todas las configuraciones, se obtuvieron las frecuencias naturales correspondientes.

Figura 4. 66

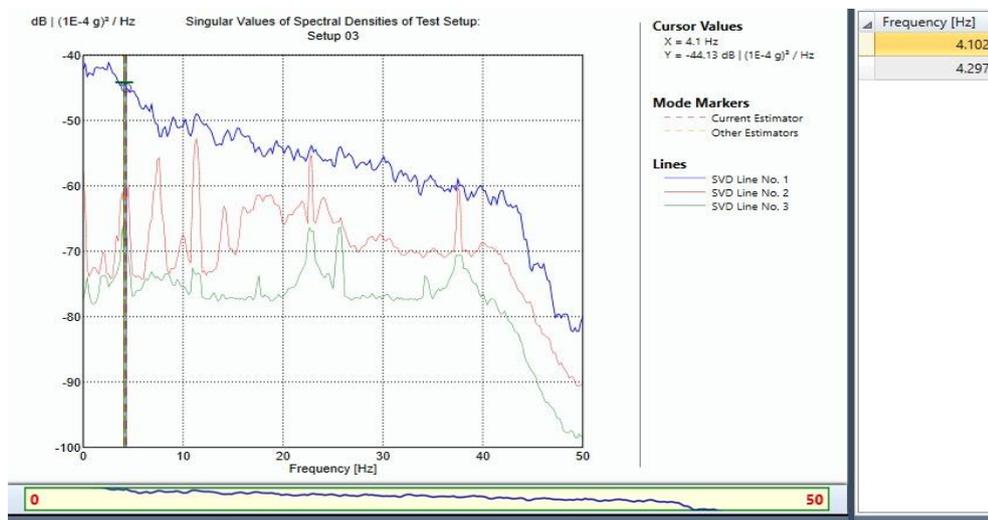
Diagrama de Densidad Espectral – EFDD



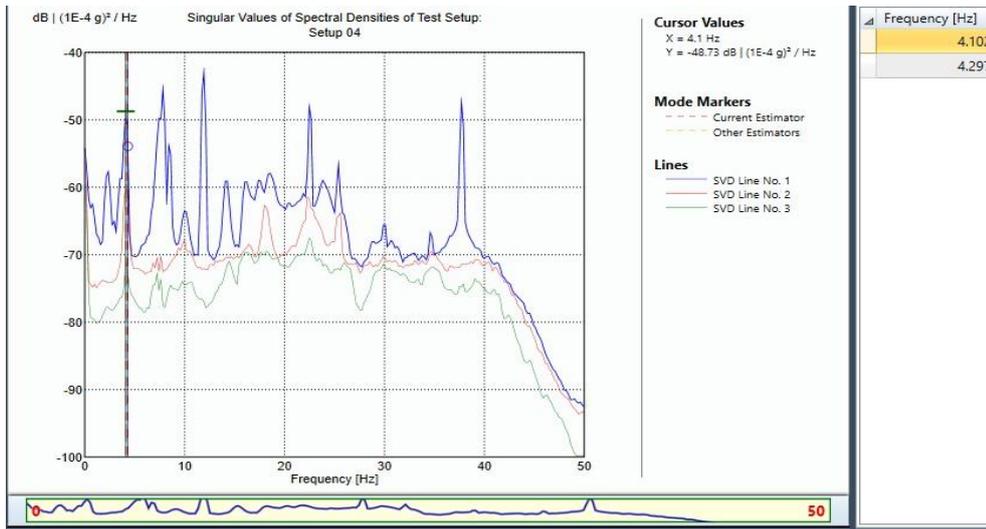
(a)



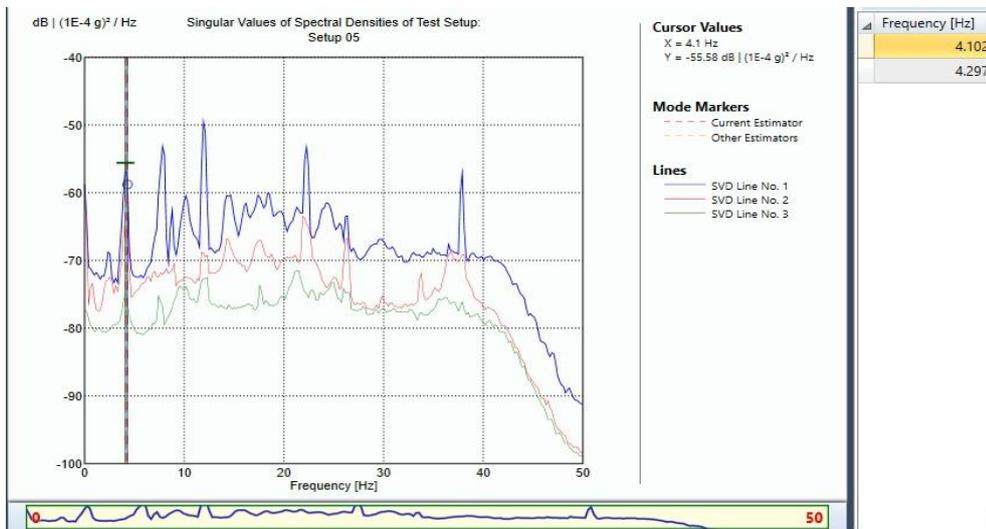
(b)



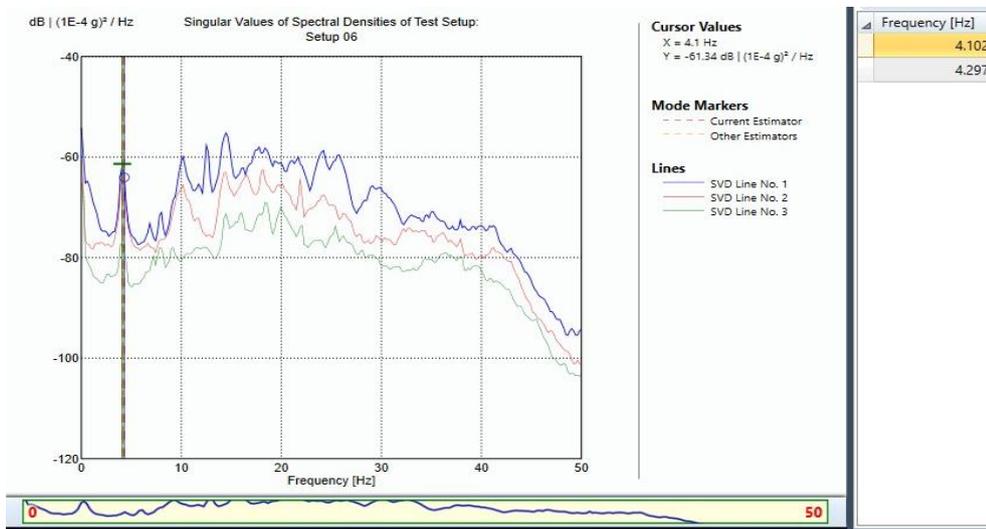
(c)



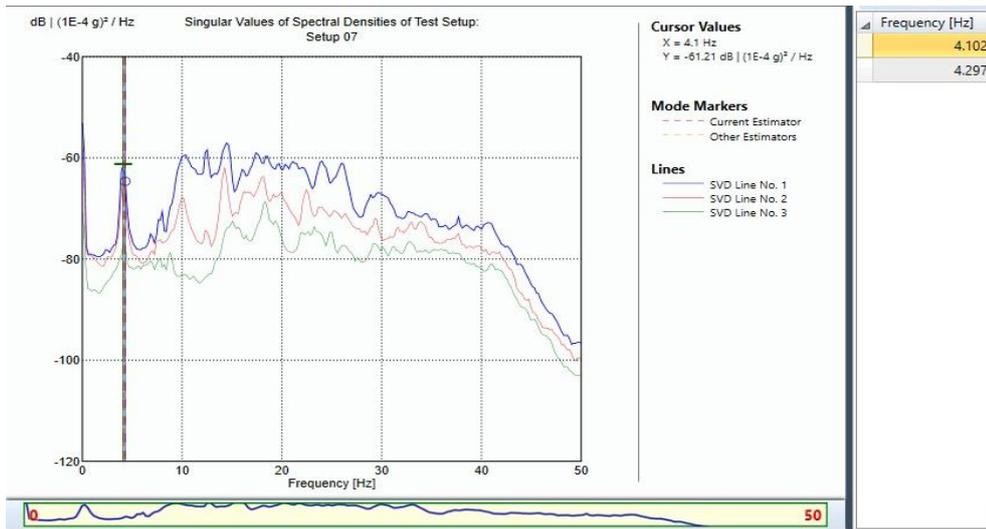
(d)



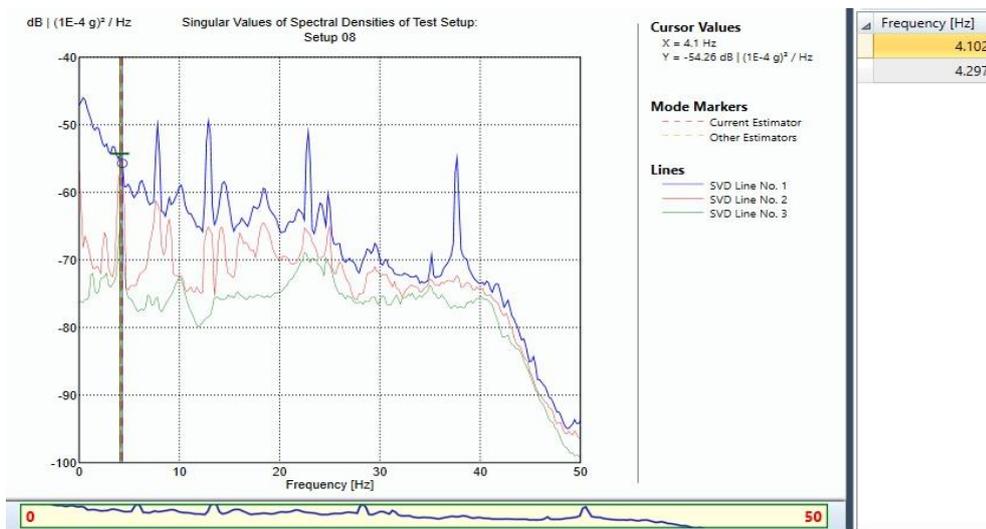
(e)



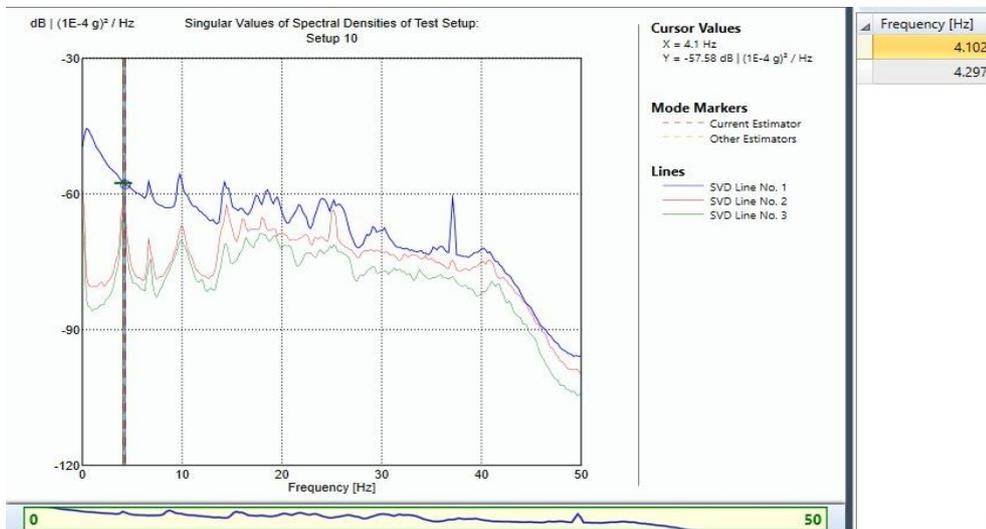
(f)



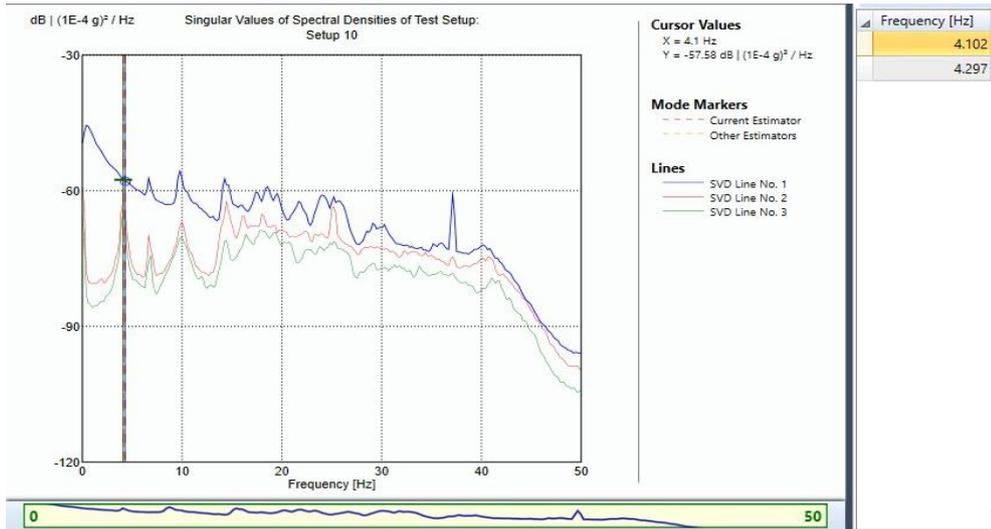
(g)



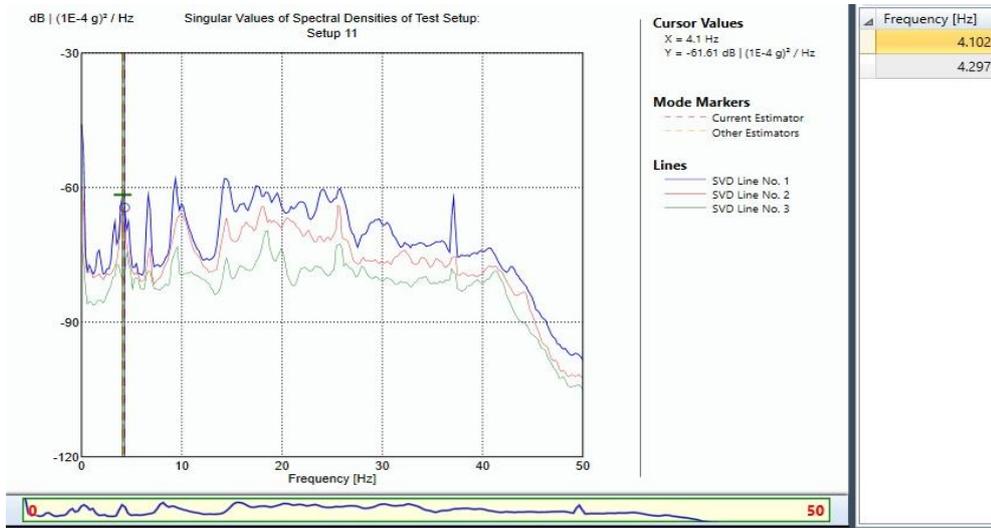
(h)



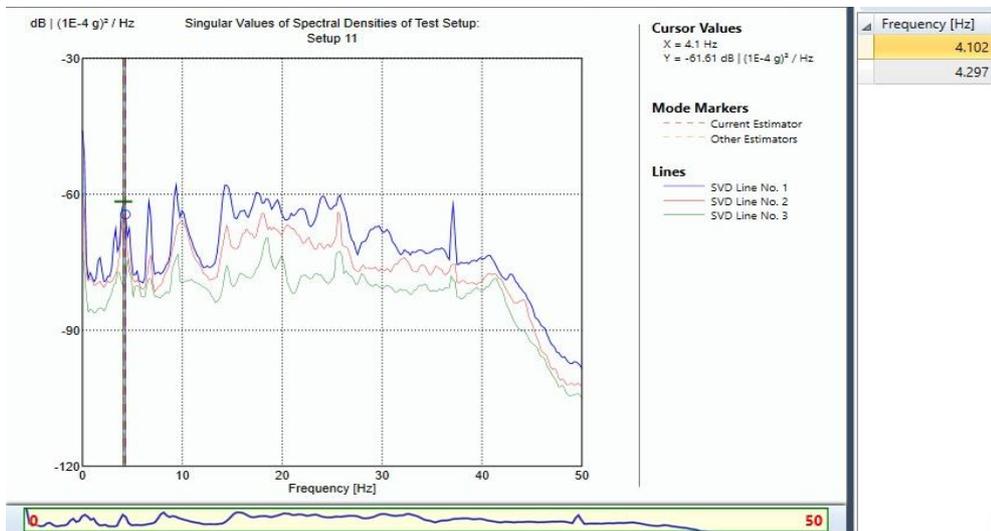
(i)



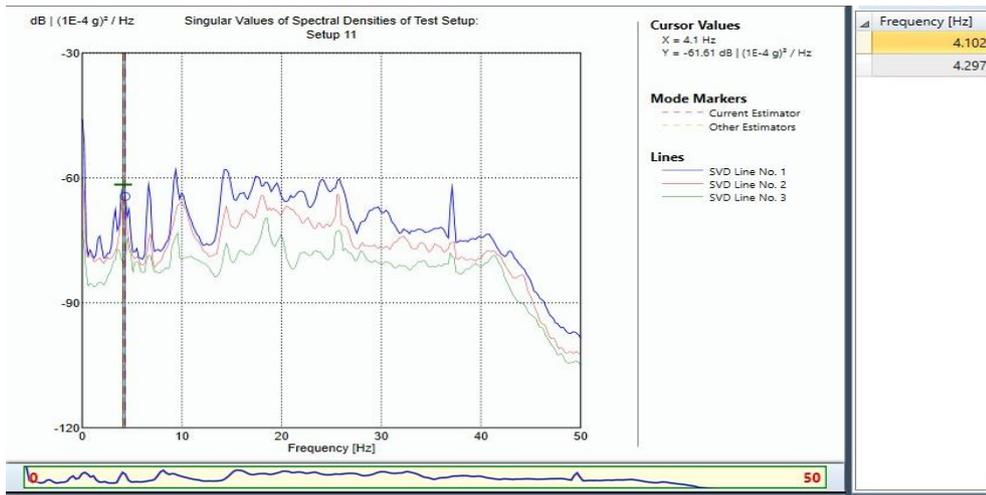
(j)



(k)



(l)



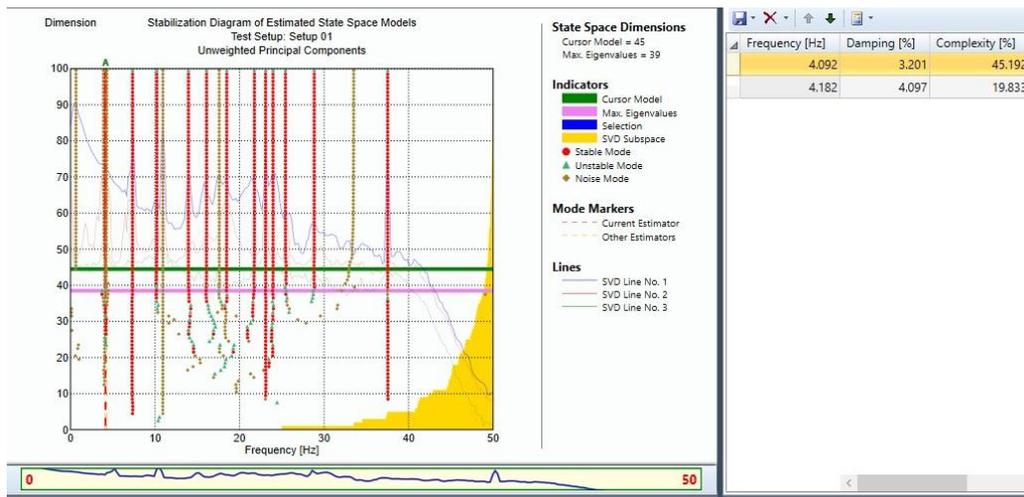
(m)

Nota: Diagrama de densidad espectral EFDD, a) Setup 1, b) Setup 2, c) Setup 3, d) Setup 4, e) Setup 5, f) Setup 6, g) Setup 7, h) Setup 8, i) Setup 9, j) Setup 10, k) Setup 11, l) Setup 12, m) Setup 13.

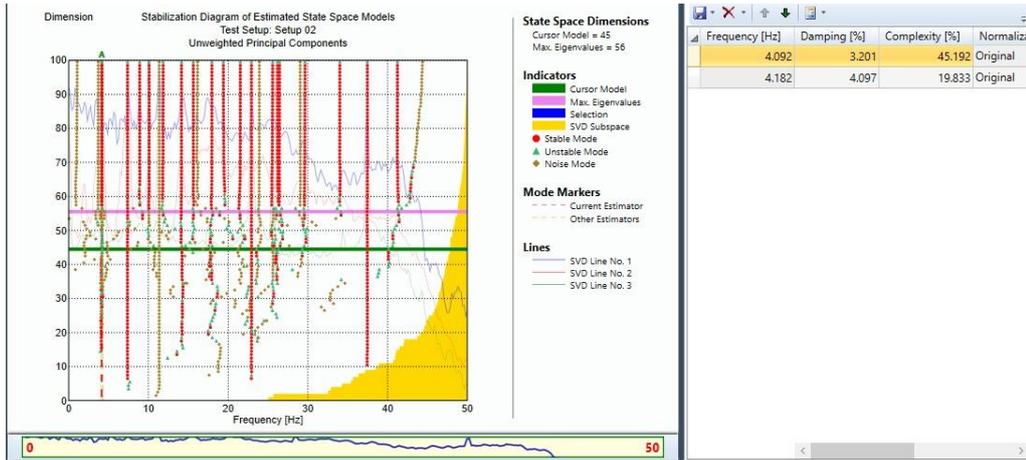
Elaborado por: las autoras

Figura 4. 67

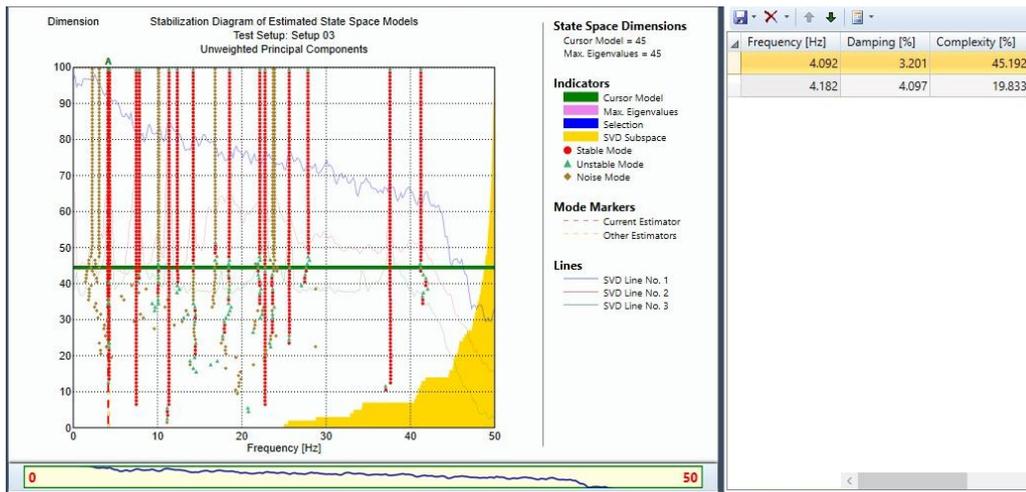
Diagrama de Densidad Espectral – SSI



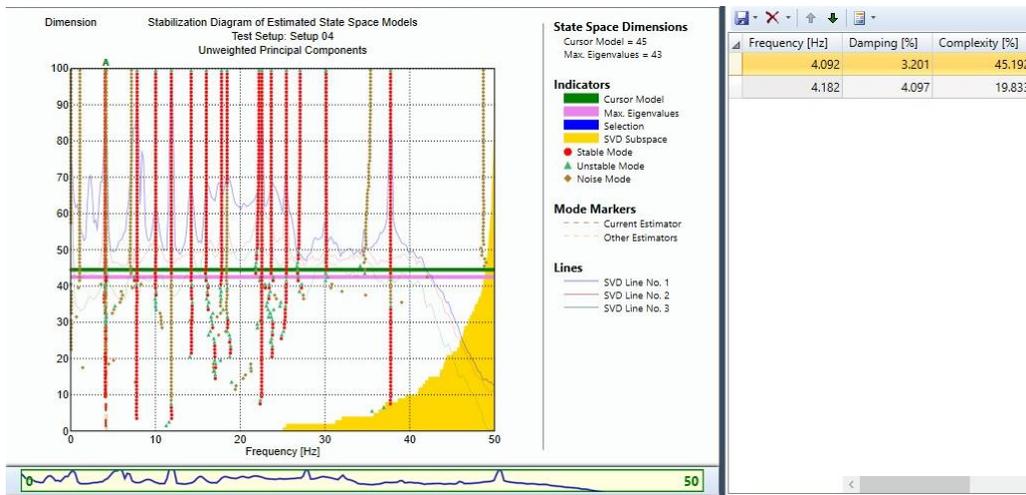
(a)



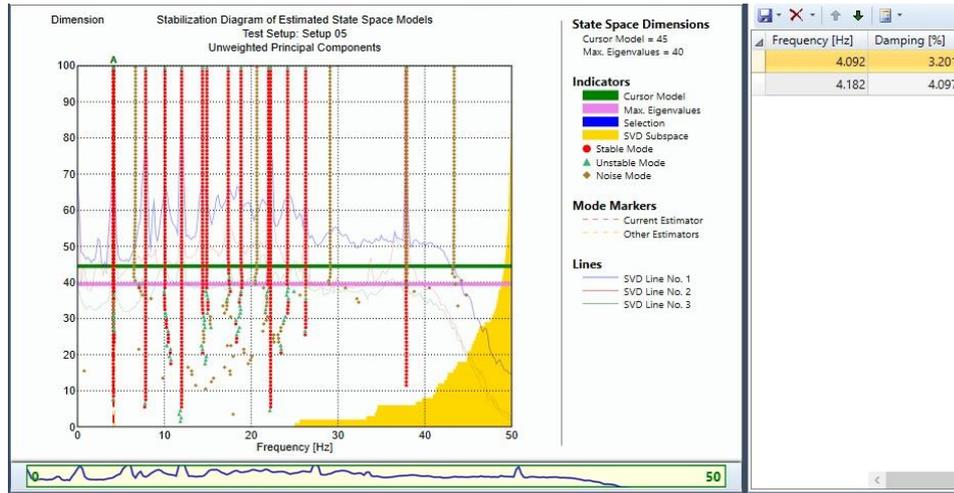
(b)



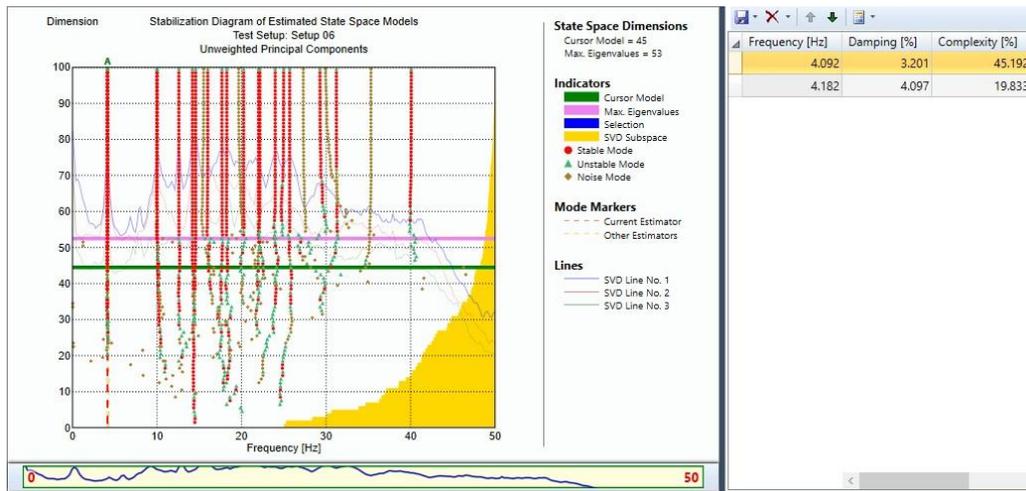
(c)



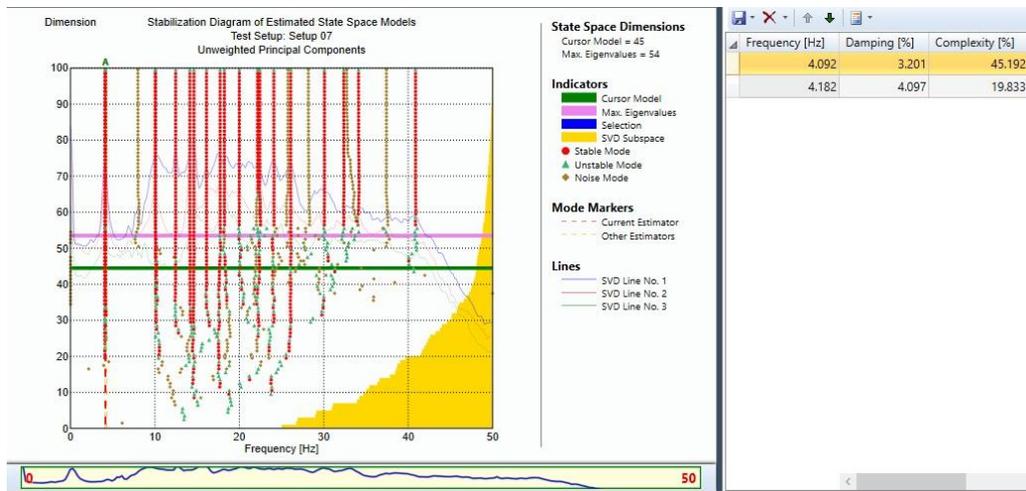
(d)



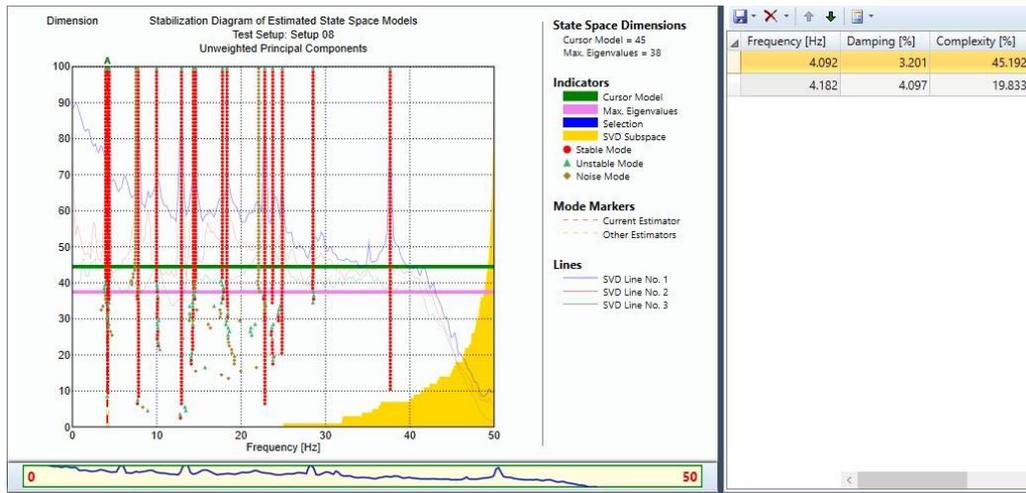
(e)



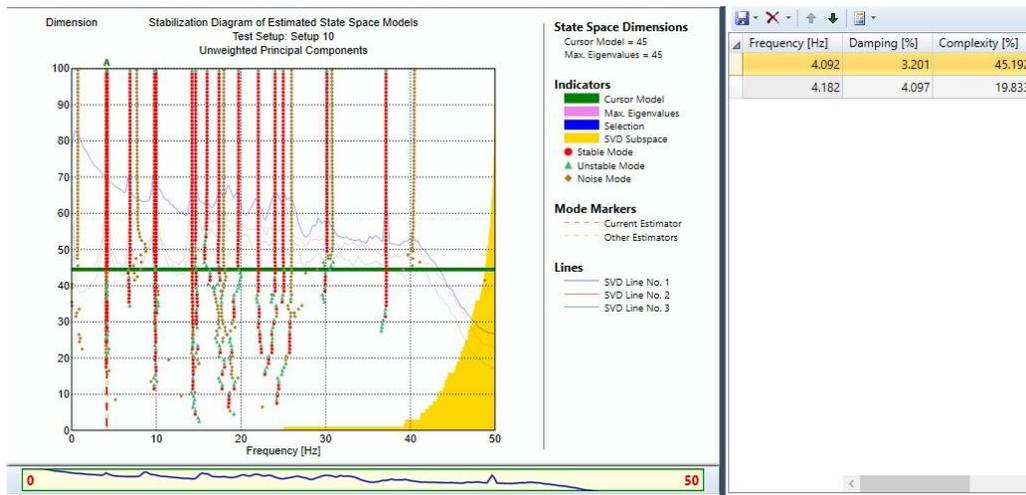
(f)



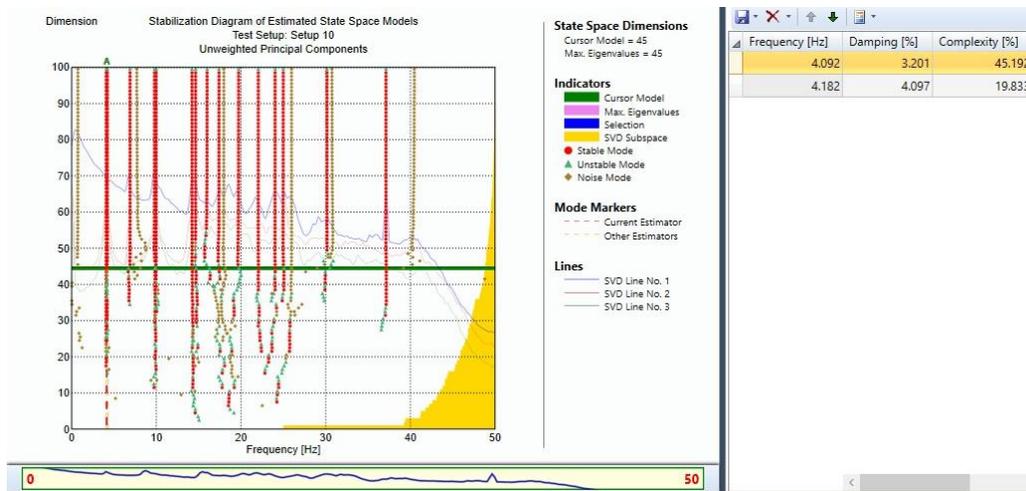
(g)



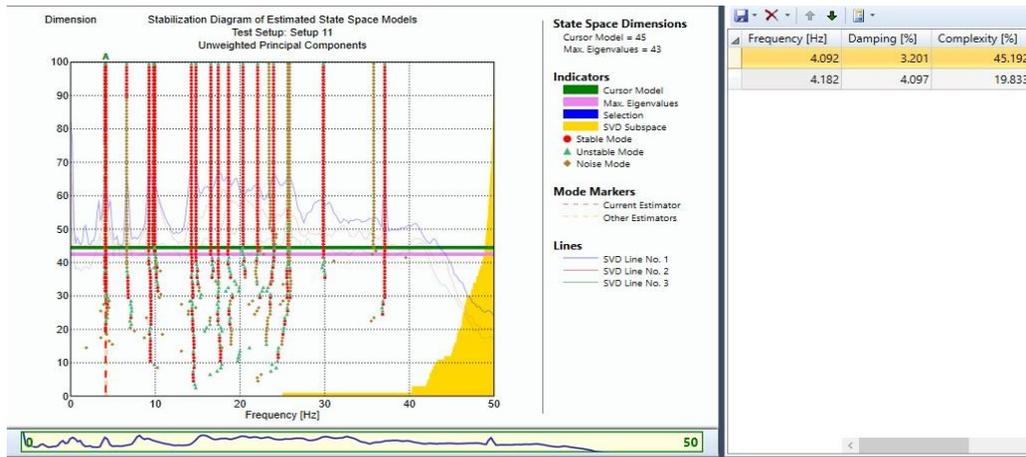
(h)



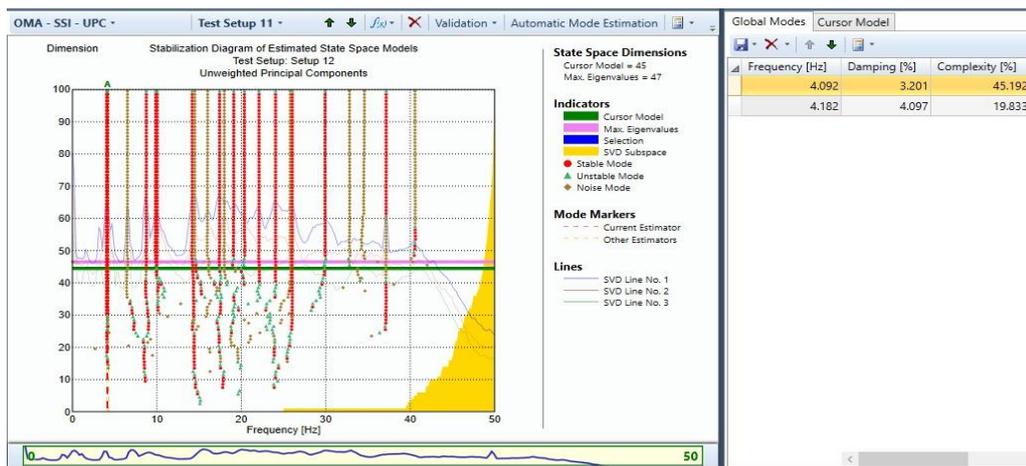
(i)



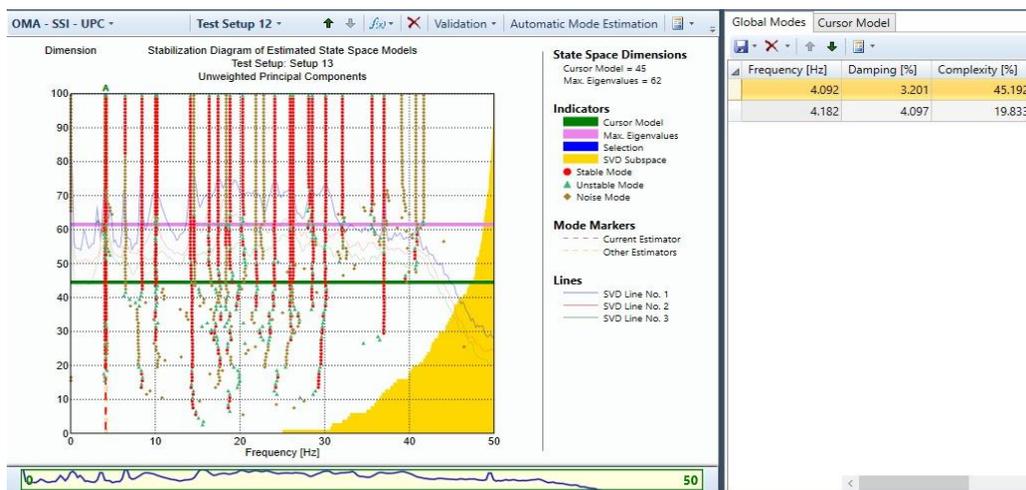
(j)



(k)



(l)



(m)

Nota: Diagrama de densidad espectral SSI, a) Setup 1, b) Setup 2, c) Setup 3, d) Setup 4, e) Setup 5, f) Setup 6, g) Setup 7, h) Setup 8, i) Setup 9, j) Setup 10, k) Setup 11, l) Setup 12, m) Setup 13.

Elaborado por: las autoras

Se aplicaron cambios en la configuración del software para implementar un proceso de disminución de la señal, en el cual se filtraron los datos en intervalos regulares de tiempo, con una frecuencia máxima de 50 Hz. Esto permite obtener una representación más compacta de los datos, conservando las características principales de la señal original. Una vez definida la configuración inicial, se procedió a calcular y descomponer las matrices relacionadas con la función de densidad espectral en valores singulares. Esta operación se realizó utilizando el software ARTeMIS Modal Pro. A partir de este proceso, se generaron los espectros promedio normalizados de densidades correspondientes a la estructura. Estos espectros son representaciones visuales que muestran cómo se distribuye la energía en distintas frecuencias. Además, brindan información relevante acerca de los modos de vibración y las propiedades modales inherentes a la estructura en análisis. Se utilizaron los métodos EFDD y SSI para obtener dos perspectivas diferentes del análisis modal.

Los datos experimentales se emplearon para identificar las propiedades modales de vibración, las cuales comprenden las frecuencias naturales, los modos de vibración y los coeficientes de amortiguamiento. A continuación, se exponen los resultados obtenidos en el contexto de este estudio.

Tabla 4. 19

Resultados Campaña Experimental

Modo	Experimental	
	Frecuencia Hz	Amortiguamiento %
1	4.092	3.201
2	4.182	4.097

Elaborado por: las autoras

4.6. Calibración del Modelo Numérico

El fin de la calibración es optimizar el modelo numérico para lograr una mejor similitud con el modelo experimental, lo que resultará en diferencias mínimas entre ellos. El proceso de calibración del

modelo numérico se realizó mediante un enfoque iterativo manual, donde la meta principal fue mejorar el valor de MAC, el modelo primigenio que ya superaba el mínimo valor establecido (0.75).

4.6.1. Primera calibración

En la primera calibración se introducen rollizos de 6" en los vanos de la parte superior de la torre(ventanas) y 8" en los dinteles de los vanos.

Figura 4. 68

Calibración 1



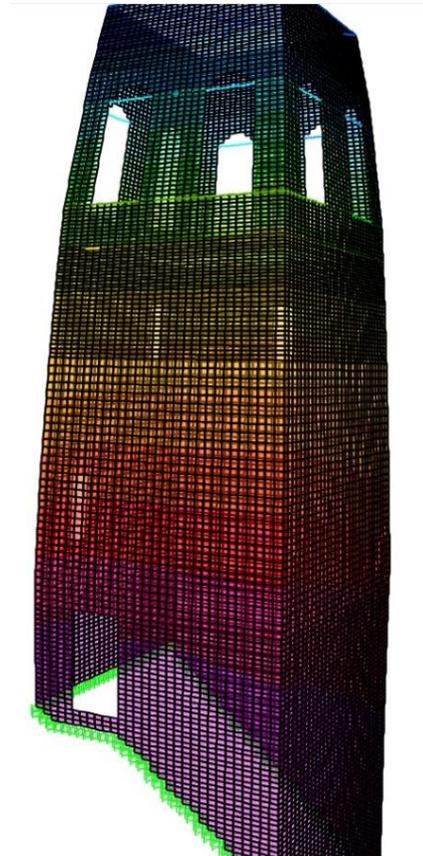
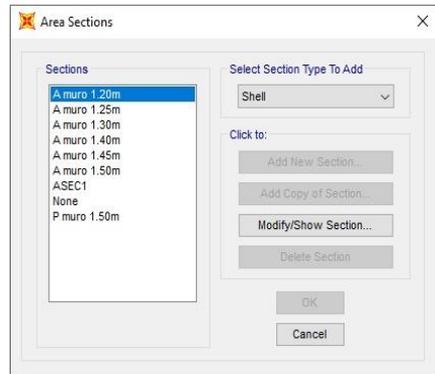
Elaborado por: las autoras

4.6.2. Segunda calibración

En la segunda calibración se define con más precisión el ancho de los muros, sobre todo en la parte superior de la torre exenta considerando con mayor detalle las secciones de los muros. Además, se descartaron dos tomas de señales `durante la campaña

experimental por presentar anomalías durante su procesamiento en el software ARTEMIS Modal PRO.

Figura 4. 69
Calibración 2



Elaborado por: las autoras

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1. Modelamiento Geométrico

El levantamiento geométrico proporcionó información precisa y detallada de la Torre exenta, permitiendo obtener una representación precisa de la estructura patrimonial en términos de su forma, dimensiones y detalles arquitectónicos.

Utilizando los conocimientos previos sobre la caracterización de la Torre Exenta y siguiendo el enfoque descrito anteriormente, se procedió a realizar el modelado de la estructura en el programa Agisoft Metashape. Para esto, se utilizaron cuatro elementos de muro, uno para cada fachada, y se incorporó un último elemento que representa la vista en planta.

En cuanto al enmallado con texturas de colores, se optó por utilizar elementos paramétricos modelados mediante familias cargables, lo que permitió obtener una representación detallada y realista de la estructura.

Se muestra el resultado final en la cual se generaron cinco ortomosaico a partir de la nube de puntos obtenida, las cuales representan las fachadas norte, sur, oeste, este y la vista en planta de la Torre Exenta (Figura 5.1).

Figura 5. 1

Ortomosaicos de la Torre Exenta



(a)



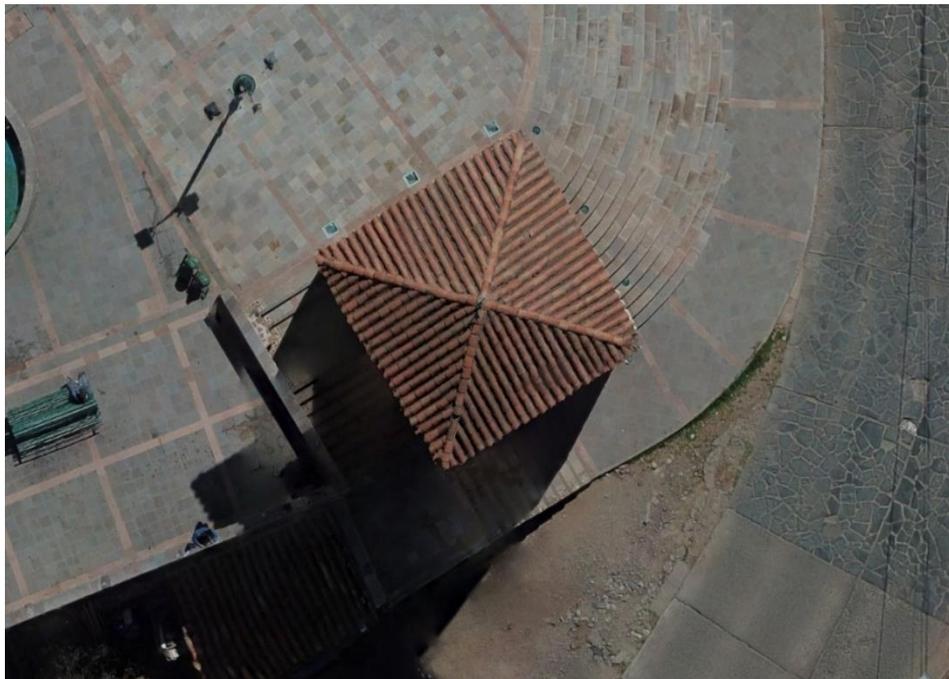
(b)



(c)



(d)



(e)

Nota: a) Fachada norte 1, b) Fachada sur 2, c) Fachada oeste 3, d) Fachada este, e) Vista en planta.

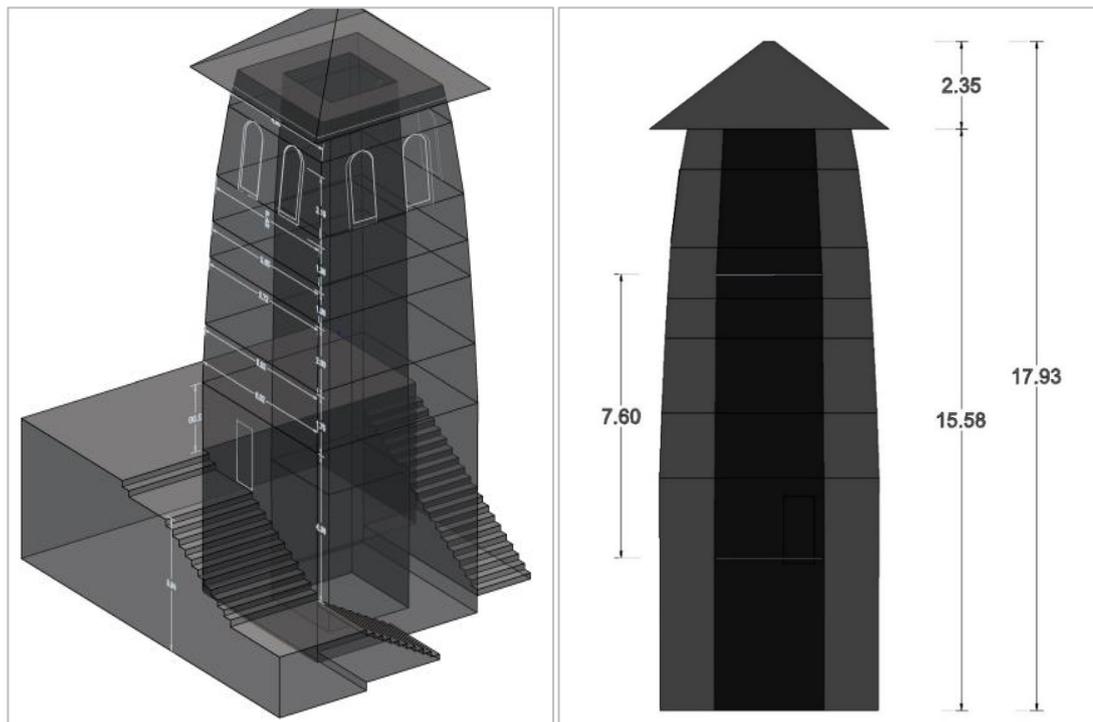
Elaborado por: las autoras

La Torre Exenta fue modelada utilizando el software AutoCAD 3D, tomando como base las medidas reales obtenidas mediante el uso de Agisoft Metashape y mediciones manuales realizadas en el sitio. Posteriormente, el modelo fue importado al software SAP 2000 para su procesamiento mediante EM.

Como resultado del levantamiento geométrico se reveló la presencia de irregularidades en la forma de la Torre Exenta. La base de la torre tiene una forma cuadrangular con un ancho de 6.00 metros en cada lado. Luego, la torre se ensancha ligeramente a 6.02 metros antes de reducir progresivamente el ancho de sus lados, alcanzando un ancho de 4.90 metros en la parte superior. La altura total de la torre, desde la base hasta la parte superior del muro, es de 15.58 metros, mientras que la altura hasta el techo es de 17.93 metros, como se muestra en la Figura 5.2. También se observó que el ancho del muro varía a lo largo de la torre, siendo de 1.50 metros en la parte inferior y disminuyendo a 1.20 metros en la parte superior.

Figura 5. 2

Modelado de la Torre Exenta en AutoCAD 3D



Elaborado por: las autoras

5.2. Propiedades Modales de Vibración

5.2.1. Resultados del modelamiento numérico

La torre exenta se modeló utilizando el software SAP 2000 mediante EM. Se divide la estructura en una malla de

elementos pequeños interconectados que representan diferentes partes de la torre, como el sobrecimiento de piedra y los muros de adobe. Cada elemento se caracterizó por las propiedades de su material datos que fueron recopilados mediante revisión bibliográfica.

Los resultados del análisis modal proporcionaron información valiosa sobre las características vibratorias de la torre. Las frecuencias naturales indican las velocidades a las que la estructura tiende a vibrar de forma más prominente. Los modos de vibración muestran cómo se deforman las diferentes partes de la torre en cada modo particular. Estos modos pueden incluir vibraciones en diferentes direcciones, torsiones o combinaciones de ambos.

Se llevó a cabo la creación de un modelo numérico de la Torre Exenta, teniendo en cuenta la designación de elementos como la mampostería de piedra, el adobe y la madera. A continuación, se presenta la tabla de resultados del análisis modal de la Torre Exenta.

Tabla 5. 1

Análisis Modal de la Estructura

Caso de salida	Numero de paso	Periodos	Frecuencia Hz	UX	UY	UZ	RZ
MODAL	1	0.2468	4.0514	0.2240	0.2850	0.0016	0.0003
MODAL	2	0.2390	4.1831	0.2780	0.2250	0.0007	0.0051
MODAL	3	0.1095	9.1282	0.0006	0.0099	0.0002	0.5390
MODAL	4	0.0926	10.7969	0.0190	0.1640	5.797E-07	0.0100
MODAL	5	0.0914	10.9369	0.1660	0.0160	0.016	0.0039
MODAL	6	0.0757	13.2062	0.0000	0.0047	0.0085	0.0000
MODAL	7	0.0699	14.2873	0.0033	0.0000	0.6340	0.0000
MODAL	8	0.0610	16.3668	0.0003	0.0030	0.0000	0.1410
MODAL	9	0.0514	19.4344	0.0110	0.0035	0.0005	0.0001
MODAL	10	0.0503	19.8661	0.0001	0.0630	0.0000	0.0008

Nota: Obtenida de los resultados de modelo de EF.

Elaborado por: las autoras

Obteniendo los siguientes datos:

Desplazamiento en X: TX=0.2390 seg.

Desplazamiento en Y: TY=0.2468 seg.

Desplazamiento Rotacional en Z: TRZ=0.1095 seg.

El análisis modal se llevó a cabo utilizando el MEF, que divide la torre en pequeños elementos para calcular su respuesta dinámica. Se utilizaron algoritmos numéricos avanzados para resolver las ecuaciones de movimiento y obtener las frecuencias naturales. Los resultados obtenidos de la frecuencia natural se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5. 2

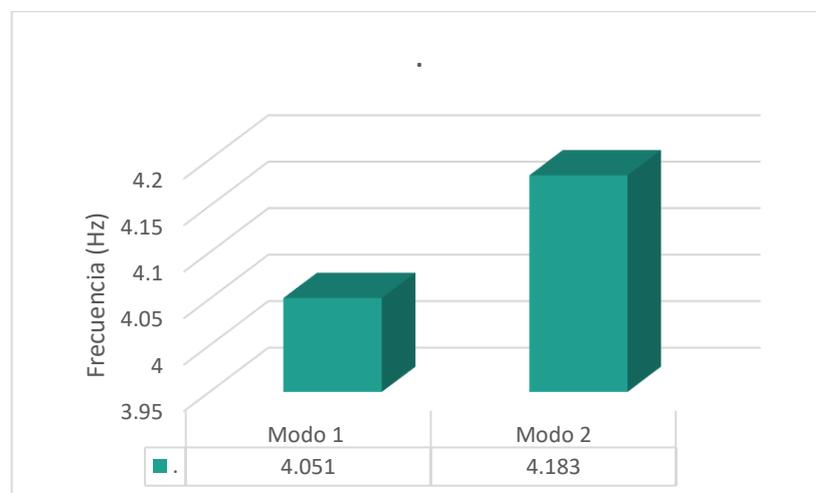
Resultados en el Modelamiento Numérico

Modo	Numérico
	Frecuencia Hz
1	4.051
2	4.183

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 3

Representación Gráfica de las Frecuencia - EF

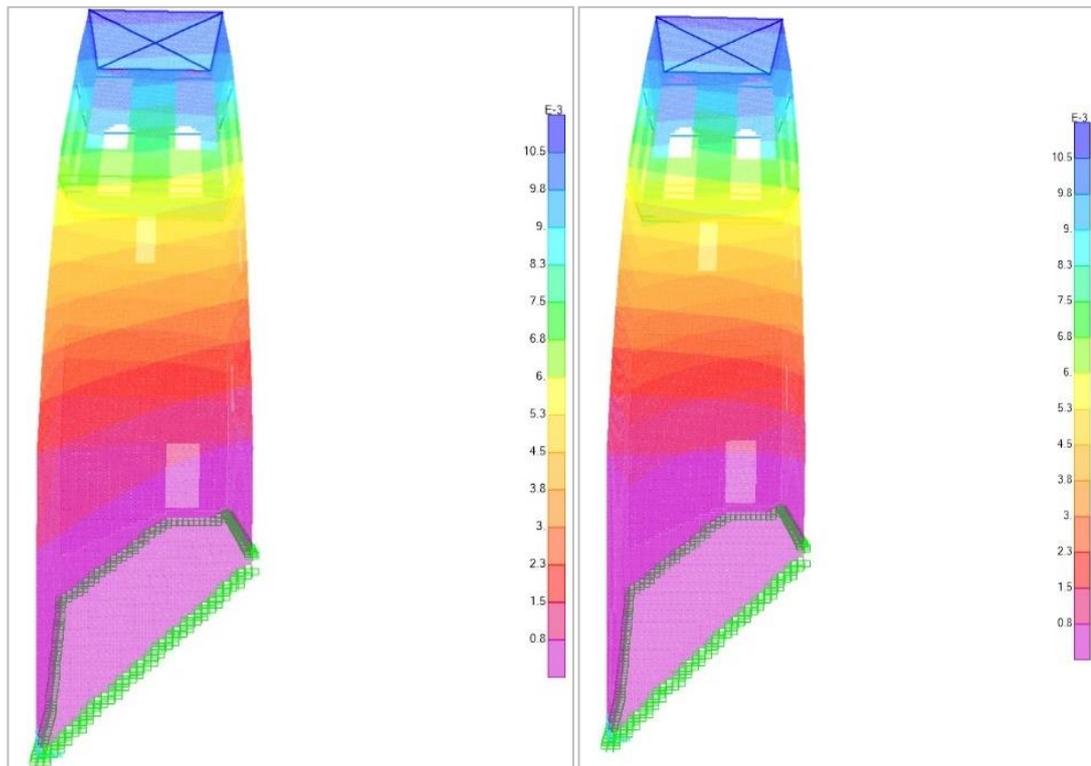


Elaborado por: las autoras

Seguidamente, se evidencian los modos de vibración, específicamente el Modo 1 y el Modo 2, presentados con las formas modales de la estructura y su patrón de movimiento respectivo.

Figura 5. 4

Forma Modal 1 y 2



(a)

(b)

Nota: a) Formas modal 1 b) Forma modal 2.

Elaborado por: las autoras

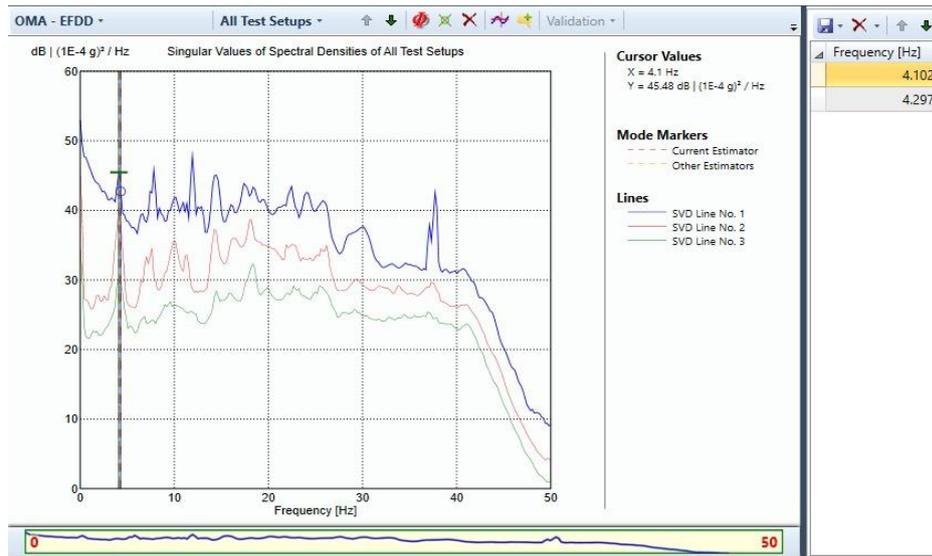
5.2.2. Resultados de Identificación Modal

Se utilizaron los métodos EFDD (Figura 5.5) y SSI (Figura 5.6) para obtener dos perspectivas diferentes del análisis modal.

Se considera que los métodos de descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia, como el EFDD, y el SSI, aplicado en el dominio del tiempo, ofrecen resultados más confiables.

Figura 5. 5

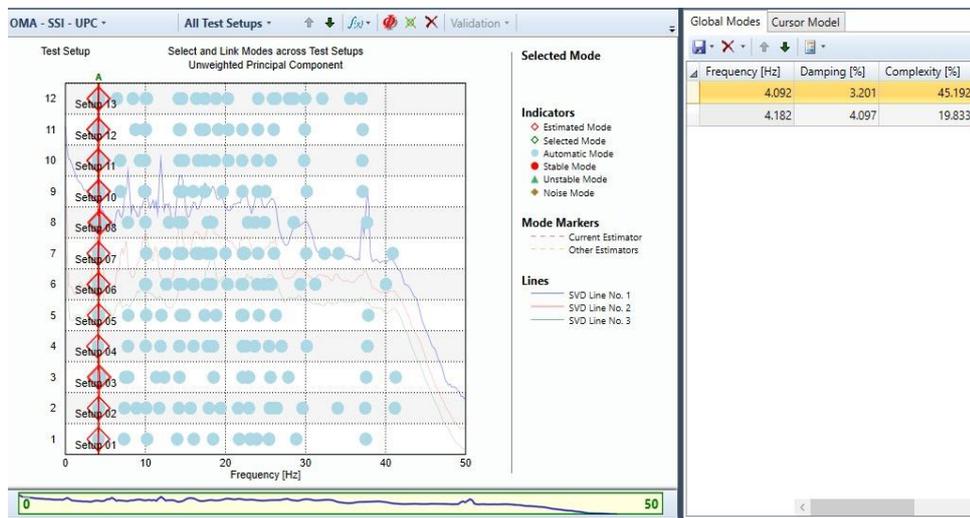
Función de Densidad Espectral Promedio -EFDD



Elaborado por: las autoras

Figura 5. 6

Función de Densidad Espectral Promedio -SSI



Elaborado por: las autoras

Validación de resultados de modelo experimental

En relación a los primeros dos modos, la concordancia entre los valores de frecuencia obtenidos mediante ambos métodos (EFDD y SSI) respalda y avala la veracidad de los datos recopilados, como se muestra en la Tabla 5.7.

Tabla 5. 3

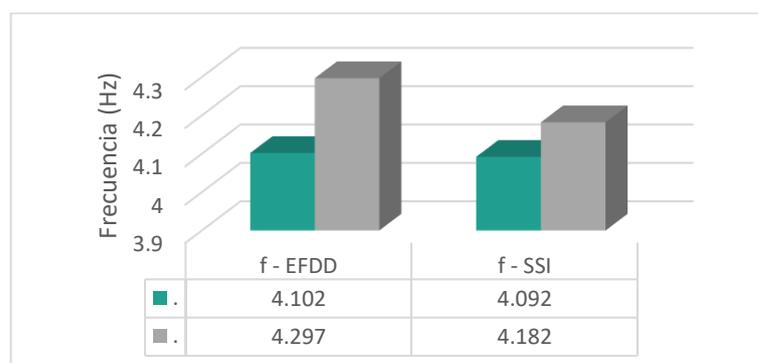
Resultados de OMA - Frecuencias Naturales

Modo	f - EFDD	f - SSI	Diferencia
	Hz	Hz	%
1	4.102	4.092	0.24
2	4.297	4.182	2.68

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 7

Datos Comparativos entre Métodos de Identificación Modal



Elaborado por: las autoras

Los resultados obtenidos son confiables ya que las diferencias entre las frecuencias naturales son muy bajas, siendo inferiores al 5%.

Mantener una diferencia menor al 5% entre los porcentajes de diferencia de los dos métodos de identificación modal garantiza precisión, fiabilidad, consistencia y comparabilidad en los resultados obtenidos. Esto puede ser crucial en aplicaciones donde se toman decisiones basadas en estos resultados o donde se busca establecer conclusiones confiables y respaldadas por evidencia.

En la Figura 5.5, los picos representan la cantidad de energía asignada a cada frecuencia, lo cual corresponde a las frecuencias naturales de la Torre Exenta.

Para obtener las frecuencias naturales definitivas (Figura 5.6), se realizó un análisis más detallado de cada

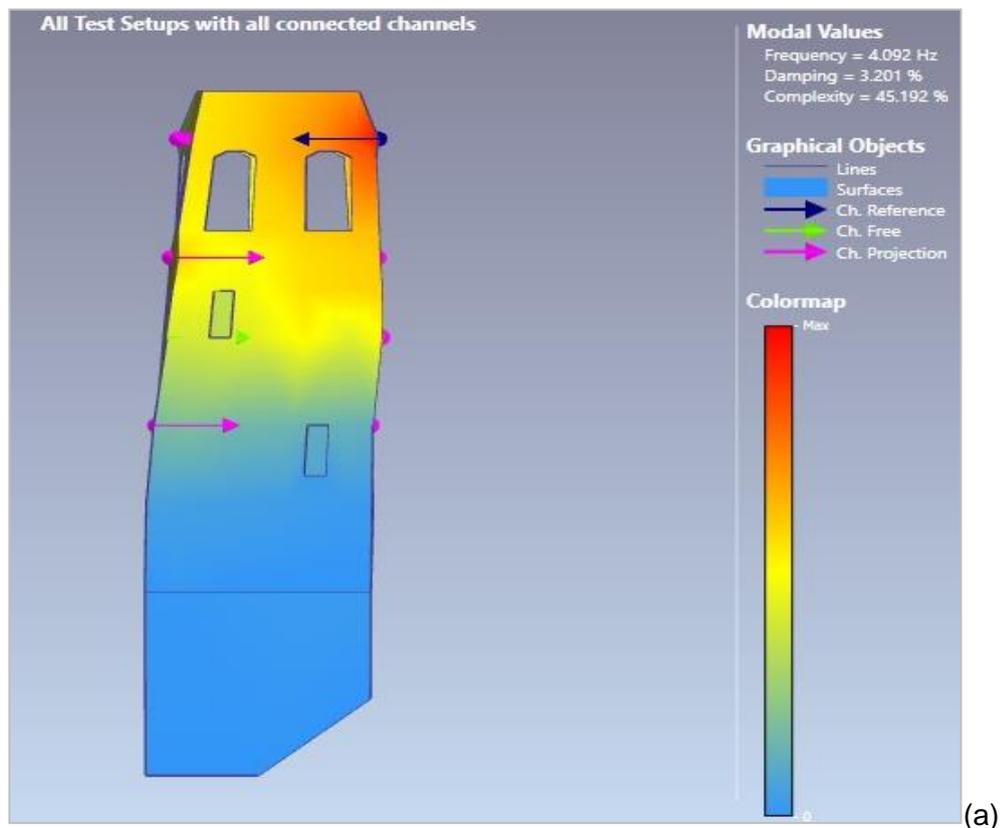
frecuencia en cada configuración y se comparó el rango de frecuencias del modelo experimental.

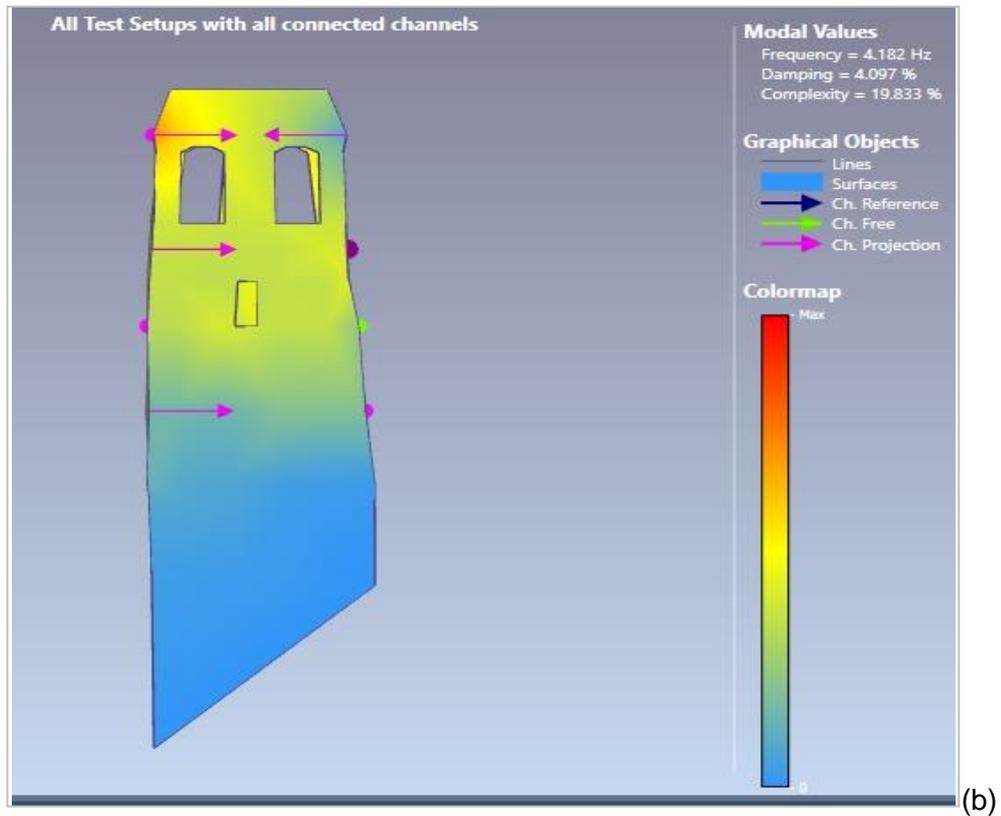
Como resultado, se obtienen frecuencias naturales de 4.092 Hz, que corresponde al primer modo de vibración con una dirección en Y, y 4.182 Hz, que corresponde al segundo modo con una dirección en X.

Una vez que se ha examinado el espectro de densidades normalizado promedio de la estructura, se procede a la identificación de los primeros modos de vibración que se encuentran dentro del rango de picos de la señal. Estos modos son considerados como representativos del modelo matemático o del tipo de estructura. Asimismo, se determinan las formas modales asociadas, como se ilustra en la Figura 5.7.

Figura 5. 8

Formas Modales – Artemis PRO





Nota: a) Forma modal en el modo de vibración 1 con valor de 4.092 Hz. b) Forma modal en el modo de vibración 2 con valor de 4.182 Hz.

Elaborado por: las autoras

Validación de resultados del modelo numérico

Se procedió a la validación del modelo numérico con el propósito de examinar la exactitud de sus resultados en comparación con los datos experimentales obtenidos.

El valor de la **frecuencia natural** está directamente vinculado a la rigidez de la estructura. En consecuencia, las alteraciones en la frecuencia natural indican cambios en la rigidez del sistema estructural, ya que en general la masa se mantiene constante. Es relevante considerar las condiciones ambientales como la humedad y la temperatura, ya que variaciones significativas en la humedad pueden generar fluctuaciones en los valores de las frecuencias naturales de hasta un 5% de su valor (según Ramos et al., 2010). En resumen, se realiza una caracterización exhaustiva de la estructura existente para obtener datos que puedan utilizarse en futuras

etapas como referencia para evaluar la evolución de las propiedades dinámicas de la estructura.

En resumen, se lleva a cabo una caracterización detallada de la estructura existente para recopilar datos que puedan utilizarse en futuras etapas como referencia para evaluar cómo evolucionan las propiedades dinámicas de la estructura.

Este modelo se valida al comparar los modos obtenidos de la campaña experimental con los modos del modelo numérico utilizando EM, tal como se ilustra en la Tabla 5.5.

Tabla 5. 4

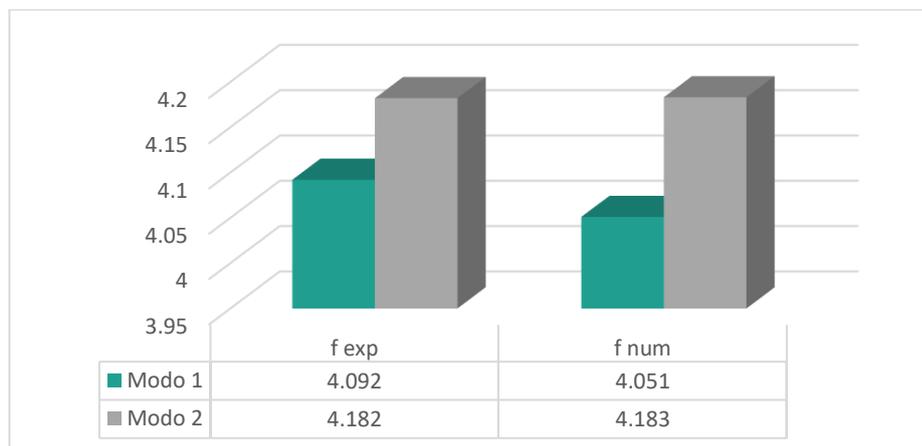
Comparación de Resultados f_{num} y f_{exp}

Modo	f_{exp} Hz	f_{num} Hz	Error %
1	4.092	4.051	0.99
2	4.182	4.183	0.03

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 9

Datos Comparativos entre Experimental y Numérico



Elaborado por: las autoras

Se observa que el modelo muestra un error inferior al 1% en ambos modos de vibración, al comparar las frecuencias entre el modelo experimental y el numérico. Es importante destacar que las diferencias de error entre los modelos son mínimas, por lo que se procederá

a analizar la similitud de las formas modales utilizando el coeficiente de semejanza modal MAC (Modal Assurance Criterion), el cual determinará si existe una relación óptima entre ambos modelos.

El valor del **coeficiente de amortiguamiento** es una medida que indica la cantidad de energía disipada por un sistema vibratorio durante cada ciclo de vibración. Se considera que un sistema tiene un buen amortiguamiento cuando el porcentaje de amortiguamiento oscila entre el 2% y el 10%. Un valor inferior al 2% indica un amortiguamiento insuficiente, lo que puede resultar en vibraciones prolongadas o inestables. Por otro lado, un valor superior al 10% indica un amortiguamiento excesivo, lo que puede causar una rápida disipación de energía y una disminución en la amplitud de vibración (Chopra , 2014).

Este modelo se valida con los modos obtenidos de la campaña experimental a través del método SSI, tal como se ilustra en la Tabla 5.6.

Tabla 5. 5

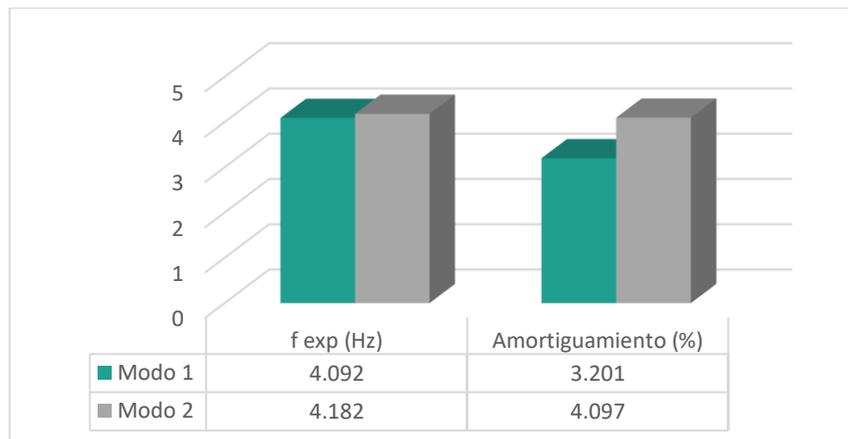
Coeficiente de Amortiguamiento

Modo	f exp Hz	Amortiguamiento %
1	4.092	3.201
2	4.182	4.097

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 10

Representación Gráfica de Frecuencia y Amortiguamiento



Elaborado por: las autoras

Se observa que el modelo muestra porcentajes de amortiguamiento de 3.201% y 4.097% obtenida mediante el método del SSI, importante destacar que sus valores oscilan entre el 2% hasta el 10% el cual indica que la Torre Exenta tiene un buen amortiguamiento.

Los resultados obtenidos mostraron frecuencias de 4.092 y 4.182 Hz para el primer y segundo modo respectivamente, con porcentajes de amortiguamiento de 3.201 y 4.097. Estos hallazgos indican un resultado confiable en el procesamiento de señales y confirman la precisión del modelo en el estudio de las propiedades modales de vibración.

El criterio de **precisión modal**, denominado como "Modal Assurance Criterion" (MAC) en inglés, se emplea como un indicador para comparar las formas modales numéricas y experimentales. Este método, propuesto por Allemang en 2003, establece una relación entre las formas modales en ambas respuestas, y su valor varía entre 0 y 1. Un valor de MAC más cercano a 1 indica una correlación más precisa entre las formas modales numéricas y experimentales.

Las formas modales numéricas se obtienen mediante análisis modales en el modelo numérico, mientras que las formas modales experimentales se derivan de los resultados del ensayo de identificación modal. La ecuación define la expresión utilizada para calcular el MAC.

$$MAC = \frac{|\{\varphi_{exp}\}^T \{\varphi_{num}\}|^2}{(\{\varphi_{exp}\}^T \{\varphi_{exp}\}) (\{\varphi_{num}\}^T \{\varphi_{num}\})}$$

Donde $\{\varphi_{exp}\}$ y $\{\varphi_{num}\}$, son los vectores que incluyen las formas modales experimentales y numéricas, de forma respectiva.

En la Tabla 5.7 se muestran la comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas, así como los resultados obtenidos mediante el cálculo del MAC.

Tabla 5. 6

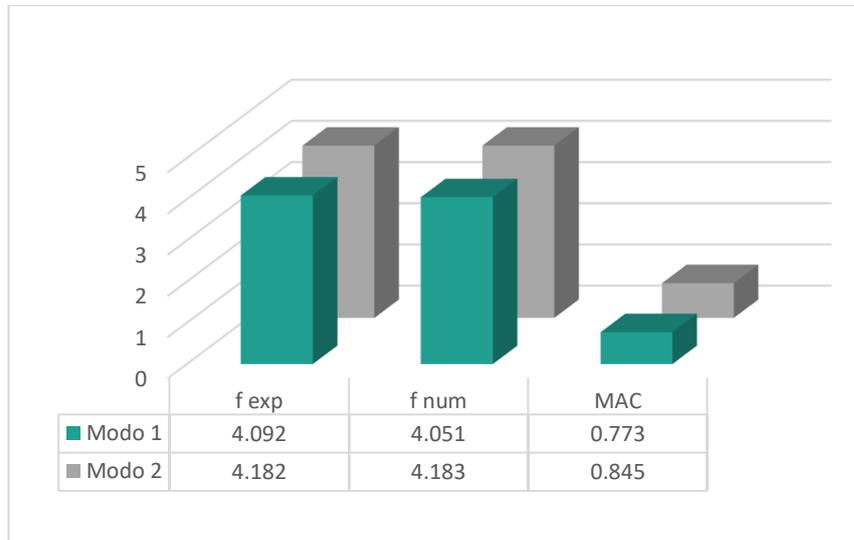
Datos Mac

Modo	f exp Hz	f num Hz	MAC
1	4.092	4.051	0.773
2	4.182	4.183	0.845

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 11

Representación sin Calibración – MAC



Elaborado por: las autoras

Se observa que los valores del MAC son superiores al valor aceptable (considerado aceptable a un valor mayor a 0.75), lo que sugiere que los modos de vibración obtenidos experimentalmente y analíticamente son relativamente similares. Sin embargo, se ejecutó una calibración de los dos modos de vibración del modelo numérico para asemejar más al modelo experimental correspondientes a las frecuencias de 4.092 Hz y 4.182 Hz, para obtener un coeficiente de semejanza más precisa entre las formas modales numéricas y experimentales.

5.3. Calibración de Modelo Numérico

Resultado – Primera calibración

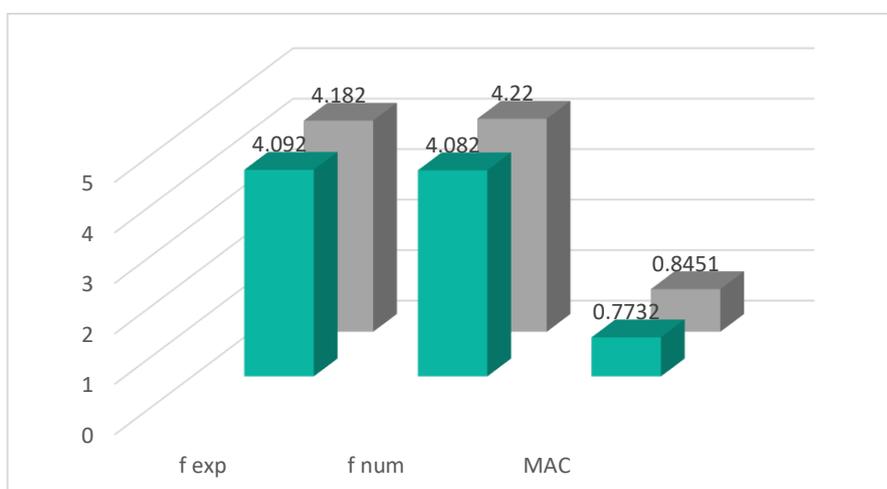
Tabla 5. 7

MAC – Primera Calibración

Modo	<i>f exp</i> Hz	<i>f num</i> Hz	MAC
1	4.092	4.082	0.7732
2	4.182	4.220	0.8451

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 12 *Representación Calibrado 1 - MAC*



Elaborado por: las autoras

Se observa que las frecuencias del modelo matemático experimentan cambios en los dos modos de vibración, lo que indica la necesidad de realizar otra iteración para mejorar el valor del MAC. Además, se realiza el cálculo del MAC para esta iteración, revelando una mejora mínima en el Modo 1, con un valor de 0.7732, mientras que en el Modo 2 alcanza un valor de 0.8541.

Resultado – Segunda calibración

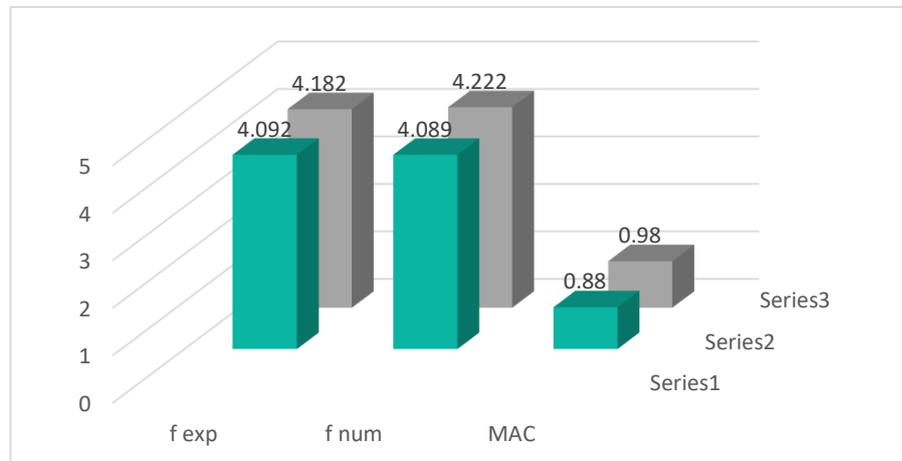
Tabla 5. 8 MAC – Segunda Calibración

Modo	f_{exp}	f_{num}	MAC
	Hz	Hz	
1	4.092	4.089	0.88
2	4.182	4.222	0.98

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 13

Representación Calibrado 2 - MAC



Elaborado por: las autoras

Al concluir el proceso de calibración del modelo numérico, se lograron obtener valores de semejanza modal MAC de 0.88 y 0.98 para el modo 1 y modo 2, respectivamente. Estos valores indican una correspondencia cercana entre los modos calculados y los modos medidos. La alta proximidad de estos valores óptimos respalda la conclusión del proceso de calibración del modelo numérico.

Se logró observar una concordancia visual entre las formas modales del modelo numérico y experimental, con un coeficiente de semejanza modal (MAC) superior a los ya obtenidos primigeniamente. Esto indica una similitud significativa en los desplazamientos entre ambos modelos.

Se difiere una variación desde el modelo numérico primigenio, calibración 1 y calibración 2 de los modos de vibración 1 y 2, el cual se contempla en la siguiente Tabla.

Tabla 5. 9

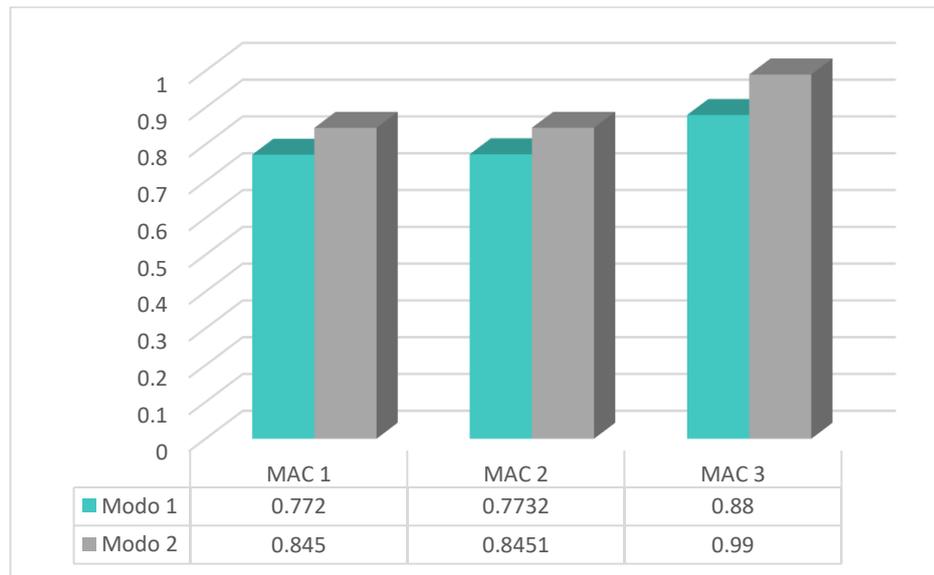
Tabla de Comparación - MAC

Modo	MAC 1	MAC 2	MAC 3
	Elementos Finitos	Calibración 1	Calibración 2
1	0.772	0.7732	0.88
2	0.845	0.8451	0.99

Elaborado por: las autoras

Figura 5. 14

Comparación MAC



Elaborado por: las autoras

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Validez de Hipótesis

Las hipótesis fueron sometidas a validación utilizando los resultados obtenidos en el estudio. Se ejecutó un análisis de los datos recopilados para verificar la veracidad tanto de la hipótesis general como de las específicas formuladas en el marco de este estudio. Los datos recolectados fueron evaluados y contrastados con los resultados finales, permitiendo así comprobar la validez de las hipótesis planteadas.

6.1.1. Hipótesis General

“Aplicando el Análisis Modal Operacional se conocerá las propiedades dinámicas de vibración para la conservación de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana en la ciudad de Cusco”.

Hipótesis: Aplicando el Análisis Modal Operacional se conocerá las propiedades dinámicas de vibración para la conservación de la Torre Exenta.

Resultado: El Análisis Modal Operacional permitió conocer las propiedades dinámicas de vibración para la conservación de la Torre Exenta.

La hipótesis general es válida porque los resultados del OMA respaldan y confirman que este método es efectivo para que se determine las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta como coeficientes de amortiguamiento, modos de vibración y frecuencias naturales. Los datos recopilados y analizados han proporcionado una comprensión clara de la respuesta vibracional de la estructura, lo que facilita a la toma de decisiones informadas en cuanto a su conservación y futuras intervenciones necesarias para su preservación.

La discusión de la hipótesis general se encuentra en la Tabla 6.1.

Tabla 6. 1

Discusión de la Hipótesis General

Hipótesis planteada	Métodos aplicados	Resultados obtenidos	Observaciones
HG: Aplicando el Análisis Modal Operacional se conocerá las propiedades dinámicas de vibración para la conservación de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana en la ciudad de Cusco	Campañas experimentales y trabajo en gabinete.	Los resultados obtenidos del Análisis Modal Operacional demuestran que este método es capaz de determinar las propiedades dinámicas de vibración para la conservación de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana en la ciudad de Cusco.	La hipótesis general es válida.

Elaborado por: las autoras

6.1.2. Hipótesis específica 1

“El levantamiento geométrico permitirá realizar el MEF de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco”.

Hipótesis: El levantamiento geométrico permitirá realizar el modelo de elementos finitos de la Torre Exenta.

Resultado: El levantamiento geométrico permite realizar el modelo de elementos finitos de la Torre Exenta.

La hipótesis específica 1 es válida porque el levantamiento geométrico de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana permite obtener una representación precisa de la geometría de la estructura, definir los elementos y sus propiedades, considerar detalles y singularidades, y validar el MEF. Estas etapas fueron esenciales para desarrollar un MEF confiable que permite conocer las propiedades de vibración de la Torre Exenta

En cuanto al modelo generado a partir de los datos recopilados, se ha utilizado el software AutoCAD 3D para su creación, incorporando las medidas reales obtenidas mediante fotogrametría aérea y mediciones manuales en campo. Esta combinación de técnicas ha permitido obtener un modelo confiable de la Torre Exenta.

La discusión de la hipótesis específico 1 se encuentra en la Tabla 6.2.

Tabla 6. 2

Discusión de la Hipótesis Específico 1

Hipótesis planteada	Métodos aplicados	Resultados obtenidos	Observaciones
HE1: El levantamiento geométrico permitirá realizar el modelo de	Fotogrametría Agisoft Metashape AutoCAD SAP 2000	El resultado del levantamiento geométrico precisa datos sobre las dimensiones y la forma de la Torre	La hipótesis general es válida.

elementos finitos de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.	Exenta. Estos datos permiten obtener una representación geométrica detallada de la estructura, lo cual es fundamental para desarrollar un modelo de elementos finitos.
--	--

Elaborado por: las autoras

6.1.3. Hipótesis específica 2

“La Propiedades modales de vibración determinará un modelo fiable de elementos finitos de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco”.

Hipótesis: Las propiedades modales de vibración determinará un modelo fiable de elementos finitos de la Torre Exenta.

Resultado: Las propiedades modales de vibración determina un modelo fiable de EM de la Torre Exenta.

La hipótesis específica 2 es válida porque las propiedades modales de vibración son fundamentales para determinar los parámetros de vibración de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana como son las frecuencias naturales, los modos de vibración y el coeficiente de amortiguamiento.

Tabla 6. 3

Parámetros Modales de Vibración

Modo	f num Hz	f exp Hz	Error %	Amortiguamiento %
1	4.089	4.092	0.07	3.201
2	4.222	4.182	0.95	4.097

Elaborado por: las autoras

Los modos de vibración se hallan en el primer y segundo modo

Se realizó la validación del modelo numérico con el objetivo de evaluar la precisión de sus resultados, las frecuencias naturales deben tener un error menor al 5%, se obtuvo valores de frecuencias naturales con un error de 0.07% y 0.95%, el cual indica que los resultados obtenidos son confiables.

El coeficiente de amortiguamiento se considera buena cuando el porcentaje varía entre el 2% y 10%. Se obtuvo valores de amortiguamiento de 3.201% y 4.097%, el cual indica que la Torre Exenta tiene un buen amortiguamiento. La discusión de la hipótesis específico 2 se encuentra en la Tabla 6.4.

Tabla 6. 4

Discusión de la Hipótesis Específico 2

Hipótesis planteada	Métodos aplicados	Resultados obtenidos	Observaciones
HE2: Las Propiedades modales de vibración determinará un modelo fiable de elementos finitos de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.	Acelerómetros Signal Express Artemis Modal Pro	El resultado de las propiedades modales de vibración proporciona información importante para la determinar un modelo fiable de elementos finitos de la Torre Exenta. Estas propiedades, como las frecuencias naturales, los modos de vibración y coeficientes de amortiguamiento, presentan valores precisos y confiables que permiten comprender cómo se distribuye la energía vibracional en la estructura y cómo se producen los desplazamientos en diferentes puntos.	La hipótesis general es válida.

Elaborado por: las autoras

6.1.4. Hipótesis específica 3

“La calibración el modelo numérico permite ajustar los parámetros modales de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco”.

Hipótesis: La calibración el modelo numérico permitirá ajustar los parámetros modales de vibración de la Torre Exenta.

Resultado: La calibración el modelo numérico permite ajustar los parámetros modales de vibración de la Torre Exenta.

La hipótesis específica 3, la calibración del modelo numérico es un proceso valido por que permitió ajustar los parámetros modales de vibración de la Torre Exenta entre los modos obtenidos de la campaña experimental con los modos del modelo numérico el cual es válida, esto implicó realizar comparaciones y análisis exhaustivos entre los hallazgos experimentales y los obtenidos a partir del modelo numérico.

Tabla 6. 5 *Resultados de Calibración de Parámetros Modales*

Modo	<i>f</i> exp	<i>f</i> num	MAC
	Hz	Hz	
1	4.092	4.089	0.88
2	4.182	4.222	0.98

Elaborado por: las autoras

MAC (Modal Assurance Criterion) compara las formas modales numéricas y experimentales, y su valor oscila entre 0 y 1, se considera un valor aceptable a un valor mayor a 0.75 el cual indica una correlación más precisa.

Se obtuvo valores de MAC de 0.88 para el primer modo y 0.98 para el segundo modo, esto indica una similitud significativa en los desplazamientos entre ambos modelos.

Tabla 6. 6*Discusión de la Hipótesis Específico 3*

Hipótesis planteada	Métodos aplicados	Resultados obtenidos	Observaciones
HE3: La calibración del modelo numérico permite definir las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco	Calibración numérica Matlab	El resultado de. la calibración del modelo numérico logra una mayor precisión y confiabilidad en la predicción de las propiedades dinámicas de vibración. Al ajustar los parámetros modales con los datos experimentales, se mejora la precisión del modelo matemático y se obtiene una información más precisa.	La hipótesis general es válida.

Elaborado por: las autoras

6.2. Contrastación de Antecedentes

Se ejecutó una comparación de antecedentes a nivel internacional y nacional, donde se contrastaron los resultados obtenidos en este estudio con investigaciones previas. Esta comparación permitió evaluar la coherencia y aplicabilidad de los resultados, así como identificar posibles similitudes o diferencias significativas.

Se consideraron tanto un antecedente internacional como uno nacional para realizar esta comparación, centrándose en aquellos que tuvieron un mayor impacto en el tema de investigación en cuestión.

6.2.1. Antecedente Internacional

En el estudio de Bru Orts (2020) desarrolló un análisis del comportamiento dinámico de varias estructuras, incluyendo una chimenea, un campanario industrial de mampostería y estructuras de hormigón construidas en la costa española en el siglo XX. El estudio se

ejecutó en el campanario de la Catedral de Fiesole en Italia, con el propósito principal de investigar la interacción dinámica relacionada con la rotación de la campana y las fuerzas de inercia generadas, además de examinar la estructura general del campanario. En relación a la segunda estructura analizada, se realizó un estudio con el fin de identificar las causas actuales de las grietas en la mampostería de las chimeneas industriales y evaluar los daños asociados, particularmente en la parte superior de las chimeneas. Con respecto a la tercera estructura, se llevó a cabo un estudio enfocado en la torre Adoc 10, ubicada en la zona costera de Alicante, con el objetivo principal de analizar los efectos combinados de la corrosión y la actividad sísmica en dichas estructuras.

Con respecto a nuestro estudio de investigación de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana, se analizaron las propiedades dinámicas de vibración a través de la calibración numérica, fue posible obtener un modelo numérico más preciso, lo que resulta necesario para el proceso decisorio relacionado con futuras intervenciones y conservación de la estructura. De esta manera, se puede establecer una relación entre ambos estudios en términos de los resultados obtenidos.

Tabla 6. 7

Discusión de Antecedente Internacional

Antecedente Internacional	Métodos aplicados	Resultados obtenidos	Observaciones
Orts (2020)	Calibración numérica de estructuras	Se analizaron las propiedades dinámicas de vibración a través de la calibración numérica, fue posible obtener un modelo numérico más preciso, lo que resulta necesario para el proceso decisorio relacionado con futuras intervenciones y conservación de la estructura.	Los resultados guardan relación en lo planteado

Elaborado por: las autoras

6.2.2. Antecedente nacional

Choquemaki Mozo & Valer Medina (2023) en su investigación mencionan que OMA es una metodología que permite estudiar el comportamiento dinámico de una estructura por medio de metodologías no invasivas, además no interfieren las condiciones de funcionamiento, de modo que se puede realizar el proceso en su estado de operación. Además, se señala que, durante la implementación de este método de análisis, se ejecutó la calibración de un modelo numérico utilizando los parámetros modales hallados a partir del modelo experimental. Las pruebas experimentales permitieron seleccionar los parámetros modales de la estructura en dos modos de vibración, con frecuencias de 3,2 Hz y 6,15 Hz de forma respectiva. Estos parámetros modales fueron utilizados como la función objetivo en el proceso de calibración, evaluando los coeficientes de semejanza modal MAC. Los resultados obtenidos fueron de 0,95 y 0,85 para los dos modos de vibración respectivamente.

Tanto en el estudio del Templo San Francisco de Asís de Marcapata como en el de la Torre Exenta del Templo Santa Ana, se concluye que el OMA es una técnica poderosa para el análisis de las particularidades dinámicas de vibración de estructuras históricas.

Tabla 6. 8

Discusión de Antecedente Nacional

Antecedente Internacional	Métodos aplicados	Resultados obtenidos	observaciones
Choquemaki Mozo & Valer Medina (2023)	Análisis Modal Operacional	Se logra la calibración de un modelo numérico utilizando parámetros modales derivados del análisis del modelo experimental. Proporciona la capacidad de analizar la estructura en su estado actual y generar propuestas de intervención.	Los resultados guardan relación en lo planteado

Elaborado por: las autoras

CONCLUSIONES

1. En relación al objetivo general, se logró evaluar la respuesta dinámica de la Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana, ubicada en la ciudad de Cusco, mediante la técnica de Análisis Modal Operacional, donde se pudo observar desplazamientos en la parte superior de la torre, en dirección "Y" para el primer modo de vibración con frecuencia natural de 4.092 Hz y coeficiente de amortiguamiento de 3.201%; y en dirección "X" para el segundo modo de vibración con frecuencia natural de 4.182 Hz y coeficiente de amortiguamiento de 4.097%. Los desplazamientos indican la magnitud y cómo la torre se mueve durante las vibraciones en esas direcciones y frecuencias específicas, mientras que los coeficientes de amortiguamiento reflejan la capacidad de la Torre para disipar energía durante las vibraciones.

Además, a través de una inspección visual no se observaron anomalías como grietas, humedad o vegetación, por lo que se concluye que la Torre Exenta se encuentra en un buen estado de conservación.

Por lo tanto, el estudio, a través de la calibración de las propiedades dinámicas de la Torre Exenta, sirve de aporte para el monitoreo del monumento histórico, es decir, ante un eventual sismo, se podrán evaluar los cambios de las propiedades dinámicas de vibración provocados por el evento sísmico, y teniendo como base un modelo numérico calibrado se podrán proponer acciones de reforzamiento, las cuales deben devolverle

los valores primigenios de sus propiedades dinámicas de vibración, cuando su estructura se encontraba en buen estado de conservación.

Así mismo, es importante señalar que, por su ubicación, la Torre Exenta se encuentra expuesta a fuentes relevantes de fuertes vibraciones, debido al tráfico urbano, vehicular y otras actividades antrópicas, por lo tanto, dichas propiedades dinámicas deben monitorearse para dar indicaciones sobre la degradación del estado de salud de la estructura, contribuyendo a establecer la necesidad de la preservación oportuna de este importante patrimonio histórico religioso.

2. El levantamiento geométrico de la Torre Exenta se realizó utilizando la técnica de fotogrametría aérea y toma de medidas manual, lo cual permitió obtener datos confiables acerca de la geometría de esta estructura histórica. Estos datos resultaron fundamentales para el posterior desarrollo del modelado de elementos finitos. Se observó que la Torre Exenta presenta una irregularidad geométrica, con una base cuadrangular que varía en anchura, oscilando entre los 6 metros en su nivel más bajo y reduciéndose a 4.9 metros en la parte superior. Además, se determinó que la altura total de la Torre es de 17.93 metros, así mismo, se confirmó que su grosor de muro varía, siendo de 1.50 metros en la base y disminuyendo a 1.20 metros en la parte superior.

3. Las propiedades modales de vibración de la Torre Exenta, como son frecuencias naturales, coeficientes de amortiguamiento y modos de vibración, se identificaron mediante el ensayo de medición de vibraciones ambientales.

Modo	<i>f</i> - EFDD	<i>f</i> - SSI	Diferencia
	Hz	Hz	%
1	4.102	4.092	0.24
2	4.297	4.182	2.68

Al procesar las señales, se emplearon los métodos de EFDD y SSI para filtrar los valores de frecuencia, consiguiendo un porcentaje de error entre sus frecuencias menor al 5%, lo cual presenta un modelo experimental válido y confiable.

El método seleccionado debido a su confiabilidad en los hallazgos fue el método SSI. Por este método se lograron detallar dos modos de vibración en un rango de 3.5 hasta 21.5 Hz. Para el primer modo de vibración se encontró una frecuencia natural de 4.092 Hz en la dirección “Y” y 4.182 Hz, para el segundo modo de vibración en la dirección “X”, con coeficientes de amortiguamiento de 3.201% y 4.097%, respectivamente.

Modo	Frecuencia natural Hz	Coefficiente de amortiguamiento %
1	4.092	3.201
2	4.182	4.097

El estudio ejecutado por Pachón en su tesis doctoral en 2014 concluyó que la existencia de problemas de rigidez en una edificación patrimonial puede ser determinada mediante la medición de su frecuencia natural, la cual debe ser superior a 1 Hz. Además, menciono que los muros con una elevada esbeltez y altos porcentajes de huecos pueden ocasionar un colapso local en la estructura, lo que indica una baja rigidez. Asimismo, la presencia de grietas en los elementos estructurales también contribuye a una disminución en la rigidez de la edificación.

Particularmente, se concluye que la Torre Exenta Santa Ana, al presentar una frecuencia natural mayor a 1 Hz y contar con muros anchos sin grietas aparentes, muestra indicios de una alta rigidez estructural y buen estado de conservación. Se subraya la importancia de evaluar la rigidez de edificaciones patrimoniales como esta Torre, para asegurar su conservación y estabilidad a lo largo del tiempo.

4. La calibración del modelo numérico proporcionó resultados valiosos y confiables obtenidos a través de la evaluación de los resultados del modelo experimental frente a los datos del modelo numérico. En una primera evaluación del MAC entre el modelo numérico y el modelo experimental se obtuvieron valores dentro del rango deseado; sin embargo, para mejorar dicho coeficiente se calibró el modelo numérico basado en el modelo experimental. Como se muestra en la siguiente tabla.

Modo	MAC 1	MAC 2	MAC 3
	Elementos Finitos	Calibración 1	Calibración 2
1	0.772	0.7732	0.88
2	0.845	0.8451	0.99

Donde se obtuvieron valores de MAC de 0.88 y 0.98 para el primer y segundo modo de vibración, respectivamente en la segunda calibración. Estos valores indicaron una alta concordancia entre los modos de vibración obtenidos del modelo numérico y del modelo experimental, cumpliendo así con el criterio de calibración establecido, lo cual sirve de base para la evaluación de propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta frente a cualquier evento extrínseco.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un constante monitoreo de la salud estructural de la Torre Exenta, en base a propiedades dinámicas de vibración calibradas en el modelo numérico, puesto que la Torre, por su ubicación, se encuentra expuesta a un alto grado de tráfico urbano y vehicular que puede modificar sus propiedades dinámicas y ocasionar su degradación estructural.
2. Realizar un mayor número de investigaciones referidos al OMA como alternativa para evaluar las propiedades dinámicas de vibración de edificaciones históricas, de manera que se fomente el uso de métodos no destructivos para la salvaguarda del patrimonio cultural de la nación.
3. Utilizar técnicas de levantamiento geométrico que ayuden a alcanzar una caracterización geométrica más real.
4. Incrementar el número de puntos de medición mediante el uso de más acelerómetros puede proporcionar una comprensión más detallada del comportamiento dinámico de la estructura. Esto permitirá capturar las variaciones en las respuestas modales en diversas ubicaciones y direcciones.

5. Es esencial elegir con atención los acelerómetros y otros dispositivos empleados en la campaña experimental. Se debe optar por acelerómetros que tengan la sensibilidad adecuada para detectar las vibraciones relevantes de la estructura. Además, asegurarse de emplear cables con la longitud adecuada para cada punto de medición y seleccionar un sistema de adquisición de datos fiable y capaz de manejar la cantidad de sensores utilizados.
6. Planificar la ubicación y orientación de los acelerómetros de manera estratégica puede permitir una mejor caracterización de los modos de vibración y patrones de movimiento de la estructura. Distribuir los sensores en diversas áreas y direcciones puede ofrecer una representación más completa de la respuesta dinámica.
7. Desarrollar pruebas de aseguramiento de los acelerómetros y cables de adquisición de datos en los puntos de medición, con el fin de prevenir cualquier interferencia o alteración en los datos recolectados durante la campaña experimental.
8. Complementar el OMA con otros métodos de evaluación, como inspecciones visuales y pruebas no destructivas. Esta combinación permite una comprensión más completa de las propiedades de la estructura y facilitará su proceso de conservación.
9. Buscar el asesoramiento de expertos en la conservación y restauración de edificaciones históricas. Ellos podrán brindar orientación específica y recomendaciones adaptadas a las características únicas de la estructura, dadas por el valor histórico y cultural de las construcciones patrimoniales.

FUENTES DE INFORMACIÓN

- Aguilar , R., Noel, M., & Ramos, L. (2019). Integration of reverse engineering and non-linear numerical analysis for the seismic assessment of historical adobe buildings. *Automation in Construction*, 98, 1-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092658051830743X>
- Aguilar, R. (2020). *Exploración, Diagnostico e Instrumentación de Construcciones Existentes, Evaluación Estructura*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Evaluación Estructural.
- Aguilar, R., Ramos, L., Torrealva, D., & Chácará, C. (13 de mayo de 2013). *Experimental modal identification of an existent earthen residential building*. IOMAC'13, 5th International Operational Modal Analysis Conference. <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-modal-identification-of-an-existent-AguilarRamos/ca7e85c905ab2ea6b7a8d34f4c112fbc06ece39c>
- Arce , D., Retamozo, S., Aguilar, R., & Castaneda, B. (2016). *A mixed methodology for detailed 3D modeling of architectural heritage*. 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC) - Anamnesis, Diagnosis, Therapy, Controls, 104-110. <https://doi.org/10.1201/9781315616995-12>
- Armesto G., González A., Riveiro R., & Rivas B. (2020). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical

buildings. *Journal of Archaeological Science*. 37(12), 3037-3047.
<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-c10d7623-14fb-390d-94ea-74371668813a>

Arteris , P., Morupoulou , A., Skentou, A., Apostolopoulou, M., Mohebkhah, A., Cavaleri , L., .et al. (2019). Stochastic vulnerability assessment of masonry structures: Concepts, modeling and restoration aspects. *Applied Sciences*, 10(3), 4-20. <https://doi.org/10.3390/app9020243>

Aşıkoğlu, A., Avşar, Ö., Lourenco, P., & Da Silva, L. (2019). Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure: Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering* 17(6), 3365-3395.
https://www.researchgate.net/publication/332157442_Effectiveness_of_seismic_retrofitting_of_a_historical_masonry_structure_Kutahya_Kur_sunlu_Mosque_Turkey

Bauer, B. (2000). *El espacio sagrado de los Incas. El sistema de ceques del Cuzco*. (Vol. 33). Centro Bartolomé de las Casas.
https://books.google.com.pe/books/about/El_espacio_sagrado_de_los_Incas.html?id=aVh8AAAAMAAJ&redir_esc=y

Bayraktar, A., Çalık, İ., Türker, T., & Ashour, A. (2018). Restoration effects on experimental dynamic characteristics of masonry stone minarets. *Materials and Structures*, 51(6).
https://www.researchgate.net/publication/328344921_Restoration_effects_on_experimental_dynamic_characteristics_of_masonry_stone_minarets

Bayraktar, A., Çalık, İ., Türker, T., & Ashour, A. (2018). Restoration effects on experimental dynamic characteristics of masonry stone minarets. *Researchgate*, 51(6).
https://www.researchgate.net/publication/328344921_Restoration_effects_on_experimental_dynamic_characteristics_of_masonry_stone_minarets

- Binda, L. A., & Saisi, A. (2005). Research on historic structures in seismic areas in Italy. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 71 - 85.
https://www.researchgate.net/publication/227742225_Research_on_historic_structures_in_seismic_areas_in_Italy
- Binda, L., Saisi, A., & Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 14(4), 199-233.
https://www.researchgate.net/publication/222704339_Investigation_procedures_for_the_diagnosis_of_historic_masonries
- Borja, M. (2016). *Metodología de la investigación para ingeniería Civil*.
https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil
- Boroscheck, R. (2015). *Dinámica estructural-Apuntes de clase (Universidad de Chile)*. FCFM Facultad de Ciencias Física y Materiales.
<https://docplayer.es/45724053-Dinamica-de-estructuras-apuntes-de-clase.html>
- Braun, S., Ewins, D., & Rao, S. (2001). *Encyclopedia of Vibration, Three-Volume Set (1° edición)*. Academic Press.
- Briceño, C. (2016). *Diagnóstico estructural y análisis sísmico de la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7072>
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2001). *Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition*. IMAC 18 : Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, USA, 625-630.
https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/12765845/Modal_Identification_from_Ambient_Responses_using_Frequency_Domain_Decomposition

- Bru Orts, D. (2020). *Evaluación del daño en estructuras esbeltas y metodología de refuerzo con materiales compuestos frente a acciones dinámicas* [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/111694>
- Caetano, E. (2000). *Dynamics of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction* [Tesis de doctorado, University of Porto]. Repositorio Institucional de la Universidad de Porto. <https://hdl.handle.net/10216/587>
- Cancino, C., Lardinois, S., D'Ayala, D., Fonseca-Ferreira, C., Torrealva Dávila, D., Vicente Meléndez, E., & Villacorta Santamato, L. (2012). *Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Estudio de edificaciones tipológicas. Vol 1*. The Getty Conservation Institute Los Angeles. <https://docplayer.es/7012049-Proyecto-de-estabilizacion-sismorresistente-estudio-de-edificaciones-tipologicas.html>
- Chacara, C. (2013). *Evaluación Estructural de Construcciones Históricas en la Costa Peruana Utilizando Tecnologías Modernas: El Caso del Hotel "El Comercio" en Lima* [Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4827/chacara_cesar_evaluacion_estructural_construccion_tecnologias_modernas_hotel_el%20comercio.pdf?sequence=1&isallowed=y
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras (4ta edición)*. Pearson Educación. https://www.academia.edu/36451323/Dinamica_de_Estructuras_4Ed_Anil_K_Chopra.
- Choquemaki Mozo, S., & Valer Medina, M. A. (2023). *Diagnóstico estructural utilizando análisis modal operacional en edificaciones históricas; caso: templo de San Francisco de Asís de Marcapata provincia de Quispicanchis-Cusco*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional de la Universidad San Antonio Abad del Cusco. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7256>

- Compan, V., Pachon, P., & Camara, M. (2017). *Ambient vibration testing and dynamic identification of a historical building. Basilica of the Fourteen Holy Helpers (Germany)*. *Procedia Engineering*, 199, 3392-3397. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.572>
- Condori, C., & Gonzales, W. (2017). *Evaluación del módulo de elasticidad de Mampostería de Adobe por los métodos destructivo y propagación de onda en el templo San Pedro Apóstol, Andahuaylillas-Cusco, 2017*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/3711>
- COTECNO (2023). *Máquina Servo-Hidráulica Universal con Válvula Proporcional*. Santiago de Chile: COTECNO. Recuperado de: <https://www.cotecno.cl/productos/maquina-servo-hidraulica-universal-con-valvula-proporcional/>
- Cunha, A. A., & Caetano, E. D. (2006). Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures, *Sound and Vibration*, 40(6), 12-20. https://www.researchgate.net/publication/254376053_Experimental_Modal_Analysis_of_Civil_Engineering_Structures
- Diaferio, M., & Giannoccaro, N. (2015). Identification of the modal properties of a building of the greek heritage. *Key Engineering Materials*, 628, 150–159. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.628.150>
- Esquivel, & Navia. (1980). *Noticias Cronologicas de la ciudad del Cusco. Tomo I*. Ediciones Talleres Gráficos P.L Villanueva S.A. <https://doi.org/10.18800/historica.198001.007>
- Ewins, D. (2000). *Modal Testing - Theory, Practice and Application (2ª edición)*. Research Studies Press LTD. https://books.google.com.pe/books/about/Modal_Testing.html?id=Z4QoAQAAMAAJ&redir_esc=y

- Friswell, M., Mottershead, J., & Ahmadian, H. (2001). Finite-element model updating. *The royal society*, 18. doi:http://michael.friswell.com/PDF_Files/J67.pdf
- Gentile , C., Saisi, A., & Cabboi, A. (2015). Structural Identification of a Masonry Tower Based on Operational Modal Analysis. *Conservation, Analysis, and Restoration*, 9, 98-110. <https://doi.org/10.1080/15583058.2014.951792>
- Gordon, P., & Toth, C. K. (2018). *Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning*. En J. Topographic Laser Ranging and Scanning (2ª edición), 1-28. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315154381-1/introduction-laser-ranging-profiling-scanning-gordon-petrie-charles-toth>
- Google LLC - Google Earth (2023). Templo Santa Ana-Cusco [Imagen satelital]. <https://earth.google.com/web/search/templo+cerca+de+Santa+Ana,+Cusco/@-13.51475932,-71.98617677,3482.37174753a,1551.45611977d,35y,-27>
- Guevara, E. (2007). *Informe final y preliquidación-Restauración y puesta en valor Monumento Histórico Artístico Templo Santa Ana*. Dirección Regional de Cultura Cusco.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación (6ª edición)*. McGRAW-HILL. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Heylen, W., Lammens , S., & Sas, P. (2013). *Modal analysis theory and testing*. Katholieke Univ. Leuven, Departement Werktuigkunde y Leuven. <https://www.worldcat.org/es/formats-editions/39737515>

- Hum-Hartley, S. (1978). Nondestructive Testing for Heritage Structures. *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, 10(3), 4-20. <https://www.jstor.org/stable/1493664>
- ICOMOS. (2004). *Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico*. International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, 1-34. https://books.google.com.pe/books/about/Recomendaciones_para_el_an%C3%A1lisis_conser.html?id=LkFJygEACAAJ&redir_esc=y
- Jordan, J. (2017). *Modeling Ozark Caves with Structure-from-Motion, Photogrammetry: An Assessment of Stand-Alone Photogrammetry: An Assessment of Stand-Alone, Photogrammetry for 3-Dimensional Cave Survey Photogrammetry for 3-Dimensional Cave Survey*. [Tesis doctoral, University of Arkansas]. University of Arkansas Repository. <https://scholarworks.uark.edu/etd/2406>
- Kaamin, M., Idris, N. A., Bukari, S. M., Ali, Z., Samion, N., & Ahmad, M. A. (2017). Visual Inspection of Historical Buildings Using Micro UAV. *International Symposium on Civil and Environmental Engineering*, 103, 1-8. . <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710307003>
- Koenderink, J., & Van Doorn, A. (1991). Affine structure from motion. *Journal of the Optical Society of America, A, Optics, Image & Science*, 8(2), 377-385. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.8.000377>
- Laefer, D., Gannon, J., & Deely, E. (2010). Reliability of Crack Detection Methods for Baseline Condition Assessments. *Journal of Infrastructure Systems*, 16(2), 129-137. https://www.researchgate.net/publication/245289039_Reliability_of_Crack_Detection_Methods_for_Baseline_Condition_Assessments
- León , J., Melchor, C., & Sánchez , V. (2020). Estudio del Fenómeno de Excitación Sincrónica Lateral caso: Puente Peatonal "Rayitos de Sol". *Ingeniería Civil, Geotecnia y/o Sismoresistente*, 2. <https://orcid.org/0000-0003-2818-0480>

- Lercari, N. (2019). Monitoring earthen archaeological heritage using multi-temporal terrestrial laser scanning and surface change detection. *Journal of Cultural Heritage*, 39, 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.04.005>
- Lourenço, P., Mendes, N., Ramos, L., & Oliveira, D. (2011). Analysis of Masonry Structures Without Box Behavior. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 369-382. <https://doi.org/10.1080/15583058.2010.528824>
- Lourenco, P. (2006). Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney, *Construction and Building Materials*, 20(4), 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.026>
- Lourenco, P., Oliveira, D., & Ingham, J. (2013). Simplified indexes for the seismic assessment of masonry buildings: International database and validation. *Engineering Failure Analysis*, 34, 585-605. https://www.researchgate.net/publication/271560022_Simplified_indexes_for_the_seismic_assessment_of_masonry_buildings_International_database_and_validation
- Lubowiecka, I., Armesto, J., & Arias, P. (2019). Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures*. 31(11), 2667-2676. https://www.researchgate.net/publication/222297185_Historic_bridge_modelling_using_laser_scanning_ground_penetrating_radar_and_finite_element_methods_in_the_context_of_structural_dynamics
- Magalhães, F., Cunha, A., & Caetano, E. (2009). Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(2), 316-329. https://www.researchgate.net/publication/222240989_Online_automatic_identification_of_the_modal_parameters_of_a_long_span_arch_bridge

- Meli, R. (1998). *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. Fundación ICA. <https://isbn.cloud/9789687508467/ingenieria-estructural-de-los-edificios-historicos/>
- Mendes Maia, N. M., & Montalvão Silva, J. M. (1997). *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press. . <https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1974855>
- Mendes, N. (2012). *Seismic assessment of ancient masonry buildings: shaking table tests and numerical analysis*. [Tesis doctoral, Univerdade do Minho]. Repositorio institucional de la Univerdade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/23110>
- Meskeel, L. (2013). UNESCO's World Heritage Convention at 40 Challenging the Economic and Political Order of International Heritage Conservation. *Current Anthropology*, 54(4), <https://journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/671136>
- Municipalidad del Cusco (2010). Cusco Monumental. Ombbligo del mundo. Lima, Perú: Navarrete
- Oré, A., & Suárez, P. (2021). *Calibración de un modelo numérico en elementos finitos de la iglesia de la Compañía de Jesús de la ciudad de Cusco*. [Tesis de bachiler, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21616>
- Pachón García, P. (2014). *Evaluación estructural de edificaciones históricas mediante análisis modal operacional (OMA)*. [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. Repositorio Institucional de la Universidad de Sevilla. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=60115>
- Palella, S., & Martins, F. (2012). *Metodología de la Investigación Cuantitativa (2ª edición)*. FEDUPEL. <https://www.mirrored.to/files/12DUA2KS/>
- Pavlidis, G. (2007). Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 93-98.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S129620740600121X>

Quelhas, B., Cantini, L., Miranda, J., & Almeida, C. (2018). Characterization and Reinforcement of Stone Masonry Walls. *Structural Rehabilitation of Old Buildings*, 2, 131-155. https://www.researchgate.net/publication/259869001_Characterization_and_Reinforcement_of_Stone_Masonry_Walls

Quelhas, B., Cantini, L., Miranda, J., & Almeida, C. (2018). Characterization and Reinforcement of Stone Masonry Walls. *Structural Rehabilitation of Old Buildings*, 2, 131-155. https://www.researchgate.net/publication/259869001_Characterization_and_Reinforcement_of_Stone_Masonry_Walls

Ramiro, W. (2018). *Structural System Identification, Model Updating, and Fragility Analysis of Masonry Heritage Structures. the Case of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile*. [Tesis doctoral- Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio Institucional Pontificia de la Universidad Católica de Chile. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/22078>

Ramos, L., Marques, L., Laurencó, P., De Roeck, G., & Campos, A. (2010). Monitoring Historical Masonry Structures with Operational Modal Analysis: Two Case Studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1291-1305. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.01.011>

Ramos, L. F. (2007). *Damage identification on masonry structures based on vibration signatures*. [Tesis doctoral, Universidade do Minho]. Repositorio de Universidade do Minho. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/7380>

Reategui, R. (2022). *S-HBIM: Herramientas de Digitalización 3D para el Diagnóstico Estructural de Edificaciones Patrimoniales*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio

Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/22570>

Remondino , F. (2021). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104-1138.
<https://doi.org/10.3390/rs3061104>

Reyners, E. (2009). *System Identification and Modal Analysis in Structural Mechanics* [Tesis de doctorado, Katholieke Universiteit Leuven]. Kasteelpark Arenberg Repository.
https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias1725723&context=SearchWebhook&vid=32KUL_KUL:Lirias&lang=en&search_scope=lirias_profile&adaptor=SearchWebhook&tab=LIRIAS&query=any,contains,LIRIAS1725723&offset=0

Riveiro, B., Gonzales, J., Conde, B., & Puente, I. (2016). Laser scanning technology: Fundamentals, principles and applications in infrastructure. *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure* (1ª Edición), 7-33.
https://www.researchgate.net/publication/306255185_Laser_Scanning_Technology_Fundamentals_Principles_and_Applications_in_Infrastructure

Rivera, J. C. (2012). El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda: caracterización con fines estructurales. *Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 25(2). http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632012000200002&script=sci_arttext

Roselli, I., Fioriti, V., Bellagamba, I., & De Canio, G. (2018). Mutual validation between different modal analysis techniques for dynamic identification of the so-called Temple of Minerva Medica, Rome. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 364, 012004. .
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/364/1/012004>

Saouma, V. (2014). *Numerical Modeling of AAR*. Department of Civil Engineering, University of

Colorado. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=9ILMBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=definicion+of+numerical+model+in+structures&ots=Vyzf_zO3RI&sig=O3lYrkVF_NtiJHJ1tZjfAGtmAIE#v=onepage&q=definicion%20of%20numerical%20model%20in%20structures&=false

Sequera, D. A., & Solano, L. F. (2018). Algoritmo para la calibración de modelos esttructurales en elementos finitos de puentes usando Ansays. *Pontificia Universidad Javeriana*, 1-103. <http://hdl.handle.net/10554/11169>

Shimpi, V., Sivasubramanian, M., & Singh, S. B. (2019). System identification of heritage structures through AVT and OMA: A review. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 13(1), 1-40. <https://www.techscience.com/sdhm/v13n1/28711>

Shults, R. (2017). New opportunities of low-cost photogrammetry for culture heritage preservation. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(51), 481-486. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-481-2017>

Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 -1974). *INGEMMET Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 3. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/251>

Sinus Messtechnik GmbH. (2023). AeroExpo Online: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/sinus-messtechnik-gmbh/product-173935-72026.html>

Siva Mondragón, G. L. (2020). *AAplicación de termografía infrarroja para el diagnóstico estructural de edificaciones históricas de adobe y quincha*. [Tesis de bachiller, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/16698>

Software Shop. (2023). *SAP 2000*. <https://www.software-shop.com/producto/sap2000#:~:text=SAP2000%20es%20un%20softw>

are%20especializado,apoyada%20en%20la%20visualizaci%C3%B3n%203D

- Soto, M., Vizcaino, I., Díaz, R., & Velasco, J. (2019). Application of Digital Close-Range Photogrammetry to the Modeling of Heritage Structural Elements for Its Analysis by FEM: An Interdisciplinary Approach. *In book: Structural Analysis of Historical Constructions*, 342-350. . https://www.researchgate.net/publication/330044684_Application_of_Digital_Close-Range_Photogrammetry_to_the_Modeling_of_Heritage_Structural_Elements_for_Its_Analysis_by_FEM_An_Interdisciplinary_Approach
- Sovero Ancheyta, S. K., & Martel Cuyubamba, C. (2014). *OMA tests and FEM updating in peruvian archaeological heritage: Chokepunkio y modal identification tests on archaeological heritage: the case of Chokepunkio*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5595>
- Tamayo, J., & Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigacion científica (4.^a ed.)*. Limusa. <https://books.google.com.pe/books?id=BhymmEqkkJwC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Tolle, H., Kartika , R., Candra, K., & Perdamean, B. (2022). Framework for Development of 3D Temple Objects based on Photogrammetry Method. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(5).
- Tralli, A., Alessandri, C., & Milani, G. (2014). Computational Methods for Masonry Vaults: A Review of Recent Results. *The Open Civil Engineering Journal*, 8(1), 272–287.
- Turek , M., Ventura , C. E., & Placencia , P. (2015). Dynamic characteristics of a 17th century church in Quito, Ecuador. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 473 II, 1259-1264.

- Valderrama, S. (2013). *Pasos para Elaborar Proyectos de Investigación Científica Cualitativa, Cuantitativa y Mixta (2ª edición)*. Editorial San Marcos.
http://www.editorialsanmarcos.com/index.php?id_product=211&controller=product
- Vidal , H. (1958). Visión del Cusco. Monografía sintética. *Garcilaso*.
https://books.google.com.pe/books/about/Visi%C3%B3n_del_Cuzco.html?id=_ihIAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Villanueva , H. (1950). Las Calles del Cusco y sus Nombres Antiguo y Moderno. *Revista Universitaria N° 136*. Editorial Universitaria, 1996-256.
- Wenzel, H., & Pichler, D. (2005). *Ambient Vibration Monitoring*. John Wiley y Sons, Ltd.
https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=4udYCoLpEvUC&oi=fnd&pg=PR5&dq=definition+of+AMBIENT+VIBRATION+in+structures&ots=xirVBX6Qnr&sig=ITbi_RbHw8UisUd14Td0L9Vvpc0#v=onepage&q=definition%20of%20AMBIENT%20VIBRATION%20in%20structures&f=false
- Yao, Y., Wang, X., Lu, L., Liu , C., Wu, Q., Ren, H., . . . Wu, K. (2021). Proportionated Distributions in Spatiotemporal Structure of the World Cultural Heritage Sites: Analysis and Countermeasures. *Sustainability*, 12 (2148). <https://doi.org/10.3390/>
- Yastikli, N. (2017). Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 423-427. doi:<https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.003>
- Zanotti, S. (2015). Seismic Analysis of the Church of Kuño Tambo - msc. [Tesis de maestría- University of Minho]. University of Minho Repositorio institucional. <https://studylib.net/doc/8442453/seismic-analysis-of-the-church-of-ku%C3%B1o-tambo---msc>
- Zecenarro, B. (2005). Las wakas, Dioses y Santuarios del Cusco prehispánico. *Waka XXI*, 1(2), 76-82.

Zecenarro, G. (2007). Cusco monumental. Arquitectura cusqueña, monumentos religiosos y civiles del Cusco. Municipalidad de Cusco.

Zini, G., Betti, M., Bartoli, G., & Chiostrini, S. (2018). Frequency vs time domain identification of heritage structures. *Procedia Structural Integrity*, 11, 460-469.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618302191>

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Ficha Técnica de Inspección	213
Anexo 2. Autorización de Acceso al Templo Santa	215
Anexo 3. Especificaciones de Acelerómetros	217
Anexo 4. Especificaciones Técnicas del Dron	219
Anexo 5. Matriz de Consistencia	221

ANEXO 1.

Ficha Técnica de Inspección



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRES

Facultad de
Ingeniería y
Arquitectura

Inspección Visual de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso de Santa Ana

Data de Inspeccion: ____/____/____

1. Datos Generales

Nombre del objeto de estudio: _____

Dirección: _____

Año de Construcción: _____

Área construida: _____

Inspección realizada por: _____

1.1. Clasificación del objeto de estudio

Público

Privado

1.2. Uso

Religioso

Museo

Otro

¿Cuál? _____

Fotografía

1.3. Interes Arquitectónico e Histórico

Si

No

1.4. Geometría de la Planta

Rectangular

Basilical

Cruz latina

Otro

¿Cuál? _____

Plano

1.5. Material dominante

Adobe

Piedra

Mixto

1.6. Número de fachadas con aberturas

Descripción: _____

2. Intervenciones Realizadas

Conservación

Restauración

Remodelación

Observaciones: _____

ANEXO 2

Autorización de Acceso al Templo Santa Ana



ARZOBISPADO DEL CUSCO

Cusco, 27 de Abril de 2023

"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"
"AÑO MISIONERO DE LOS LAICOS"

Prot. Nro. 0640-AC-2023
Exp. Nro. 0671-2023 (Ref. Inf. 041-OPP-2023)

Señorita
Karla Paola Masías Zanabria
CIUDAD.-

AUTORIZACIÓN

El suscrito, MONS. RICHARD DANIEL ALARCÓN URRUTIA, ARZOBISPO DEL CUSCO, con domicilio en el Palacio Arzobispal ubicado en la calle Hatun Rumiyoc S/N del distrito, provincia y departamento de Cusco.

AUTORIZA:

A la Srta. **Karla Paola Masías Zanabria** con DNI N° 44517820 y a **Luz Carmen Huallpataype Carpio** con DNI N° 70218394, Bachilleres de Ingeniería Civil de la Universidad San Martín de Porres; para que realicen el trabajo de investigación- visitas técnicas y toma de fotografías en el **Templo de Santa Ana**.

El trabajo de campo se realizará los días 28-04-2023, jueves 04-05-2023. Viernes 05-05-2023, jueves 11-05-2023 y viernes 12-05-2023.

Por lo señalado se **AUTORIZA** el acceso al **Templo de Santa Ana** de las solicitantes junto a las siguientes personas:

- | | | |
|---------------------------------|-----------------|------------------|
| • Matt Airton Valer Medina | DNI N° 73544352 | Asesor de Tesis |
| • Dax Giancarlo Choque Corbacho | DNI N° 71477217 | Operador de Dron |

En salvaguarda del Patrimonio del templo, deberá firmar un convenio para toma y uso de imágenes, así como el compromiso de entregar una copia de la investigación al Arzobispado del Cusco.

Séame propicia la oportunidad para renovarles las seguridades de mi alto aprecio y personal deferencia.



+ RICHARD DANIEL ALARCÓN URRUTIA
ARZOBISPO DEL CUSCO

Recibido
02/05/2023

Karla Masías Zanabria
Karla Masías
ZANABRIA

ANEXO 3.

Especificaciones de Acelerómetros

Product Specifications

	ENGLISH	SI
Performance		
Sensitivity ($\pm 10\%$)	10 V/g	1.02 V/(m/s ²)
Measurement Range	0.5 g pk	4.9 m/s ² pk
Frequency Range ($\pm 5\%$)	0.7 to 450 Hz	0.7 to 450 Hz
Frequency Range ($\pm 10\%$)	0.5 to 750 Hz	0.5 to 750 Hz
Frequency Range (± 3 dB)	0.2 to 1700 Hz	0.2 to 1700 Hz
Resonant Frequency	≥ 2500 Hz	≥ 2500 Hz
Broadband Resolution (1)	0.000004 g rms	0.00004 m/s ² rms
Non-Linearity	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Transverse Sensitivity	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Environmental		
Overload Limit (Shock)	± 300 g pk	± 2950 m/s ² pk
Temperature Range	0 to +176 °F	-18 to +80 °C
Base Strain Sensitivity	≤ 0.0005 g/ $\mu\epsilon$	≤ 0.005 (m/s ²)/ $\mu\epsilon$
Electrical		
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 10 mA	2 to 10 mA
Output Impedance	<500 Ohm	<500 Ohm
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC
Discharge Time Constant	0.5 to 2.0 sec	0.5 to 2.0 sec
Settling Time	<100 sec	<100 sec
Spectral Noise (1 Hz)	0.50 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	4.9 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise (10 Hz)	0.10 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	1.0 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise (100 Hz)	0.07 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.7 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise (1 kHz)	0.05 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.5 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Physical		
Sensing Element	Ceramic	Ceramic
Sensing Geometry	Flexural	Flexural
Housing Material	Titanium	Titanium
Sealing	Hermetic	Hermetic
Size - Diameter	0.99 in	25 mm
Size - Height	1.22 in	31 mm
Weight	1.8 oz	50 gm
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack
Electrical Connection Position	Top	Top
Mounting Thread	10-32 Female	10-32 Female

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.

SENSOR

ANEXO 4.

Especificaciones Técnicas del Dron

ANEXO 5.

Matriz de Consistencia

Título de Tesis: ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE VIBRACIÓN DE LA TORRE EXENTA DEL MONUMENTO HISTÓRICO RELIGIOSO SANTA ANA UBICADO EN LA CIUDAD DE CUSCO

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Indicador	Diseño
PG: ¿Cuál es la influencia del análisis modal operacional para evaluar las propiedades dinámicas de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco	OG: Determinar la influencia del Análisis Modal Operacional para evaluar las propiedades dinámicas de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco	HG: Aplicando el Análisis Modal Operacional se conocerá las propiedades dinámicas de vibración para la conservación de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana en la ciudad de Cusco	X: Análisis Modal Operacional	Frecuencia natural	Tipo de investigación: Aplicativa
				Modos de vibración	Nivel de Investigación Explicativa
					Diseño de Investigación Experimental
					Enfoque de investigación Cuantitativa
Problema Específicos	Objetivo Específicos	Hipótesis Específicos	Variable Dependiente		Población y muestra
PE1: ¿Cuál es la importancia del levantamiento geométrico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco?	OE1: Desarrollar el levantamiento geométrico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco	HE1: El levantamiento geométrico permitirá realizar el modelo de EF de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso ubicado en la ciudad de Cusco.	Y: Propiedades dinámicas de vibración	Geometría de la Torre Exenta	Población: Edificios patrimoniales de la ciudad de Cusco Muestra: Torre Exenta del Templo Histórico Religioso Santa Ana que presenta una geometría irregular con altura de 17.93m.
				Modelo numérico de elementos finitos	Instrumentos
					Modelo numérico experimental
PE2: ¿Cuáles son las propiedades modales de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco?	OE2: Determinar las propiedades modales de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.	HE2: La Propiedades modales de vibración determinará un modelo fiable de elementos finitos de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.	Modelo numérico calibrado	Procedimiento	
				1. Recopilación Histórica 2. Levantamiento Geométrico 3. Desarrollo de Elementos Finitos 4. Ensayos de Identificación Modal 5. Calibración del modelo numérico	
PE3: ¿Cuál es el proceso para la calibración del modelo numérico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco?	OE3: Determinar la calibración el modelo numérico de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.	HE3: La calibración el modelo numérico permite definir las propiedades dinámicas de vibración de la Torre Exenta del Monumento Histórico Religioso Santa Ana ubicado en la ciudad de Cusco.			