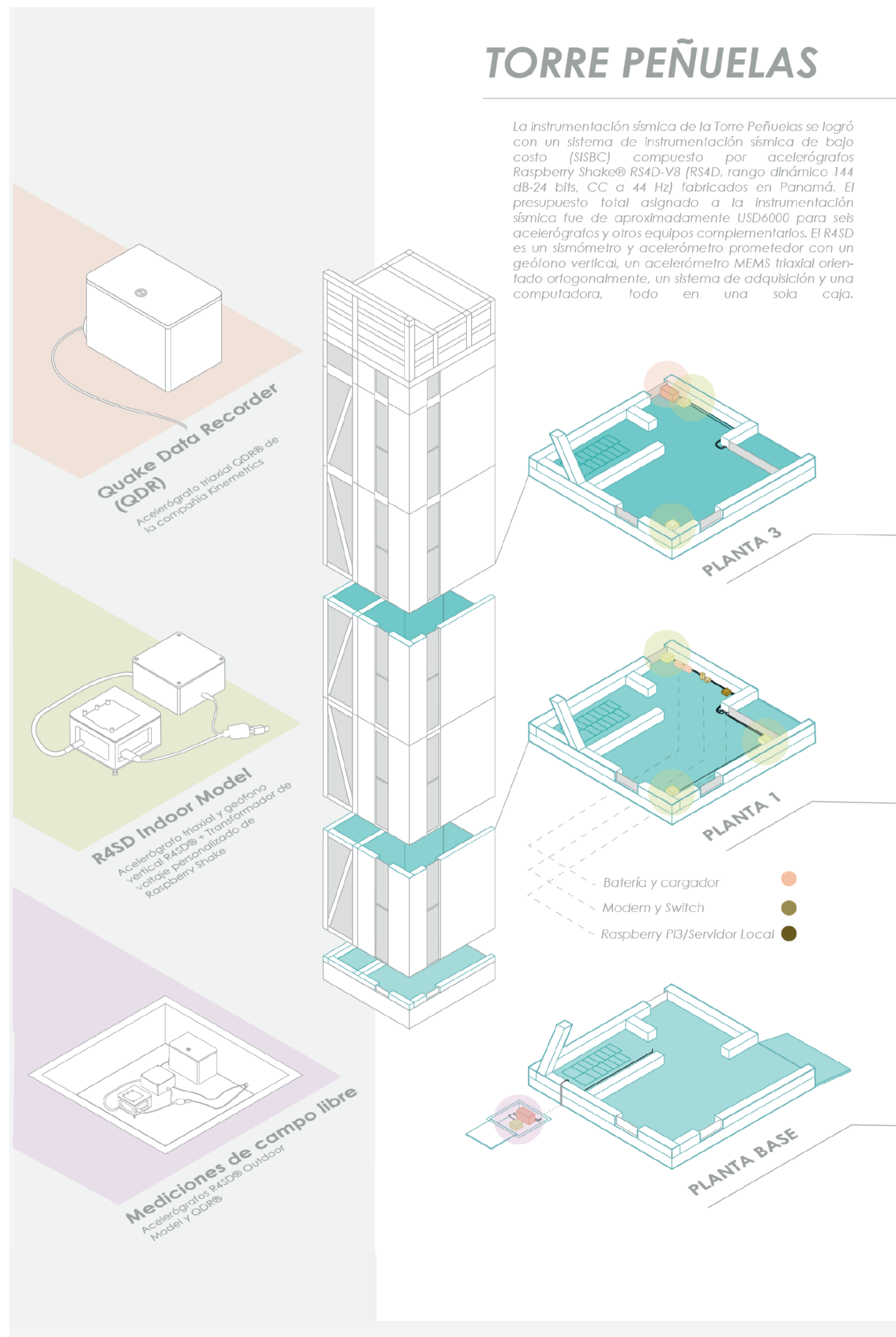


# MONITOREO ESTRUCTURAL DE TORRE PEÑUELAS MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE BAJO COSTO

El presente trabajo de título describe la implementación y validación de un sistema de instrumentación sísmica de bajo costo (SISBC) para el monitoreo de la salud estructural del primer edificio experimental de madera de estructura ligera de 6 pisos de América del Sur (Torre Peñuelas). Además, el acoplamiento del SISBC con un sistema de medición de temperatura y humedad relativa ha permitido investigar las variaciones de las propiedades dinámicas del edificio inducidas por el ambiente. El SISBC se ha realizado utilizando seis acelerógrafos Raspberry Shake® R4SD (R4SD), que se interconectaron mediante una red local controlada por una Raspberry Pi3 (RPi3) auxiliar. La función del RPi3 consiste en: (i) actuar como un servidor NTP que permite la sincronización de los instrumentos sísmicos; (ii) estar conectado a Internet para proporcionar control remoto y comunicación; (iii) estimar las propiedades dinámicas del edificio utilizando el método FDD a partir de pruebas de vibración ambiental por hora basadas en los datos de velocidad obtenidos de los geófonos verticales incluidos en los instrumentos R4SD.



**Palabras clave:** Instrumentación sísmica de bajo costo, Raspberry Shake, Monitoreo de salud estructural, Test de vibraciones ambientales, Edificio de madera de entramado ligero, Análisis modal operativo.

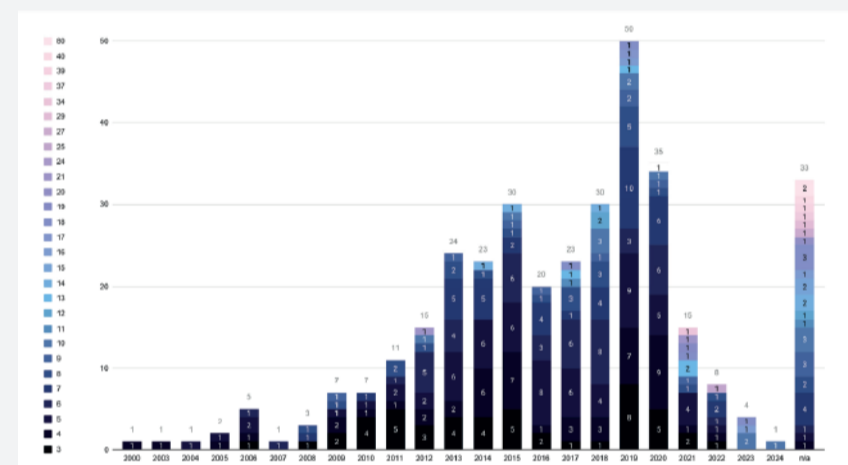


Figura 1: Número de edificaciones por año de finalización, divididos según altura (en metros) [1].

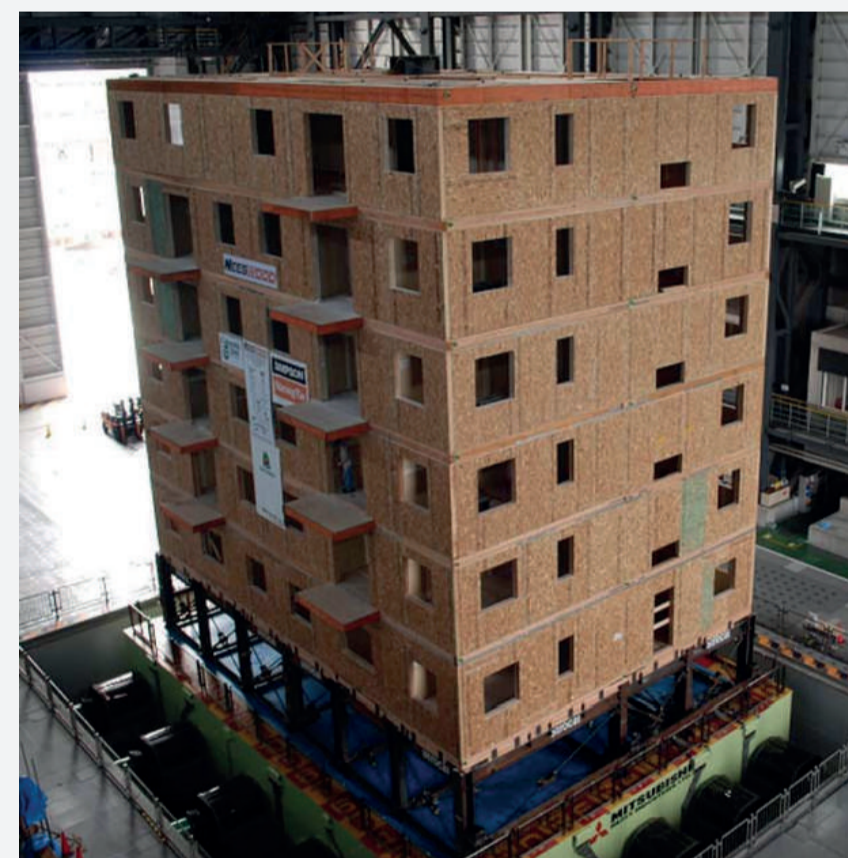


Figura 2: Ensayo en mesa vibratoria de edificio de 6 pisos en Nikki, Japón [2].



Figura 3: Torre Peñuelas.

El SISBC se alimenta eléctricamente mediante una batería y un cargador de batería para garantizar la operatividad durante los cortes de energía. Las frecuencias naturales y las formas modales del edificio se identificaron a partir de análisis modales operativos de cinco pruebas de vibración ambiental integradas, medidas por un sistema de instrumentación sísmica convencional (Episensors ES-U2), que muestran propiedades dinámicas consistentes. Además, el SISBC también fue validado contra pruebas de mesa vibratoria, observándose una buena concordancia para frecuencias de señal menores a 25-30 Hz en comparación con los sistemas de medición convencionales, así como midiendo la respuesta durante un sismo de baja intensidad Mw=4.6. Una vez que se validó el SISBC, se agregó un sensor BME280 para monitorear continuamente la temperatura y la humedad relativa dentro del edificio, lo que permitió implementar un sistema de monitoreo de salud estructural para rastrear las variaciones inducidas por el ambiente de las tres frecuencias naturales principales.

Se determinó una alta sensibilidad de las frecuencias naturales del edificio debido a las variaciones ambientales, exhibiendo variaciones diarias peak-to-peak de 9.5-10.9% y variaciones promedio de 25.2-29% durante un periodo de siete meses, evidenciando así que las estructuras de madera podrían ser más susceptibles a las variaciones de temperatura y humedad relativa que otros sistemas estructurales. Inesperadamente, se descubrió que la estructura de madera era más rígida en condiciones de humedad, lo que puede atribuirse al endurecimiento de los ensamblajes de madera debido a la hinchazón de la madera. Se construyó un modelo de espacio-estado de 24 horas para calcular con precisión las frecuencias naturales estimadas en función de la temperatura y la humedad relativa registradas, lo que demuestra que este procedimiento podría usarse para desagregar de manera efectiva las variaciones inducidas por el ambiente de cambios generados por daños u otras fuentes desconocidas.

## Introducción

Apuntar a edificios de madera más altos es una tendencia en crecimiento en la industria de la construcción y la comunidad científica [1]. La principal razón para la reconsideración de la madera para edificios más altos es el desarrollo de nuevos sistemas estructurales más resistentes, como CLT, así como la necesidad ampliamente reconocida de reducir la huella de carbono de la industria de la construcción. A medida que aumenta la altura de los edificios construidos, las propiedades dinámicas de la estructura cobran mayor importancia. En el caso de los edificios con estructura de madera, el estudio de estas propiedades cobra especial relevancia puesto que la madera suele verse más afectada que otros materiales por las condiciones climáticas y de servicio debido a su naturaleza orgánica e higroscópica.

## Descripción de la Torre Peñuelas

La Torre Peñuelas es reconocida como el primer edificio de entramado ligero de 6 pisos construido en Sudamérica [3]. Este edificio de madera está considerado como un edificio pionero en la región no solo por su altura de 19,4 m, sino también porque ha sido fabricado y ensamblado en un proceso de construcción modular altamente prefabricado. La torre fue diseñada por el Centro de Innovación de la Madera de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y fabricado por TecnoFast S.A.

## Análisis Operacional Modal

Se realizaron cinco registros de vibración ambiental en la Torre Peñuelas. Los registros de vibración ambiental se realizaron utilizando 11 o 12 acelerómetros convencionales altamente sensibles Episensor ES-U2 [4].

Tabla I: Comparación de las frecuencias medidas durante un día frío (11,7-13,2 °C) de fecha 22-10-2020 y un día cálido, (27,6-28,4 °C) de fecha 26-11-2020. Ambos días mostraron formas modales consistentes.

Measuring day	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
Cold day	2.16-2.19 Hz	2.93-2.97 Hz	3.13-3.16 Hz	4.77-4.86 Hz	6.03-6.06 Hz
Warm day	2.02-2.04 Hz	2.81-2.81 Hz	3.01-3.03 Hz	4.56-4.59 Hz	5.63-5.74 Hz
	<b>Mode 6</b>	<b>Mode 7</b>	<b>Mode 8</b>	<b>Mode 9</b>	
Cold day	7.18-7.38 Hz	9.38-9.53 Hz	13.19-13.22 Hz	15.63-16.32 Hz	
Warm day	6.68-6.69 Hz	8.93-9.00 Hz	12.65-12.98 Hz	16.10-16.86 Hz	

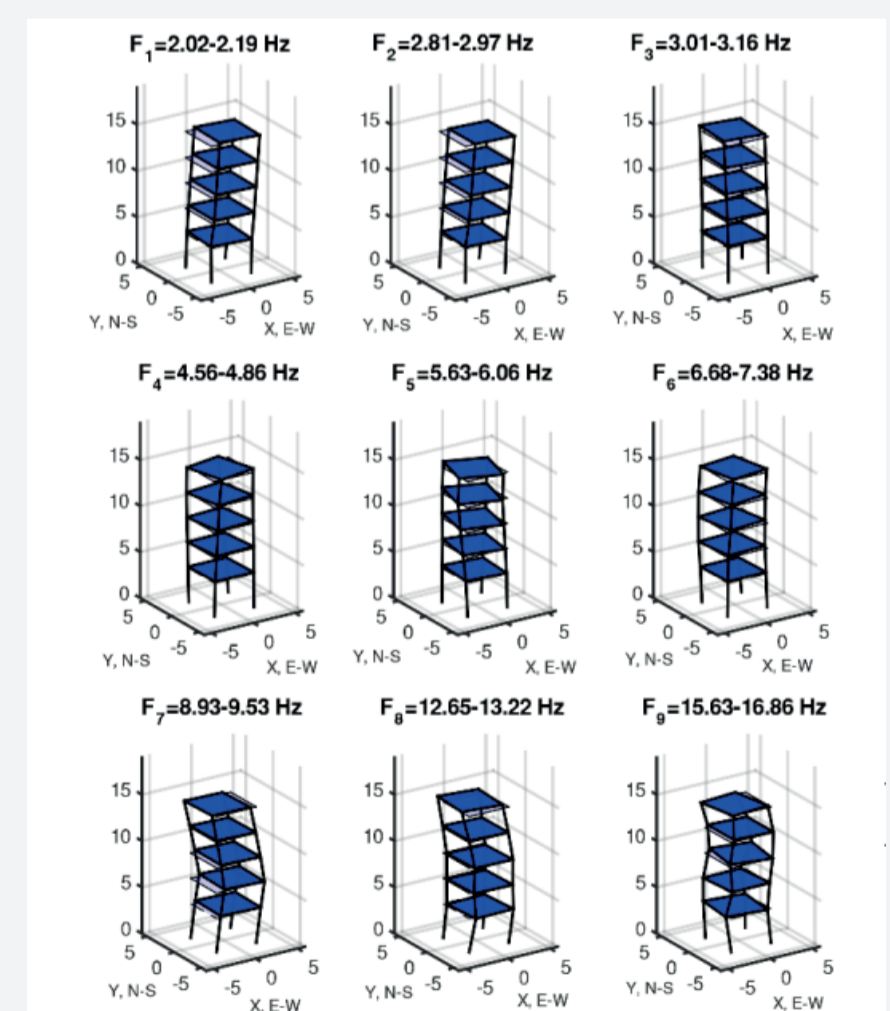


Figura 4: Vista 3D de las formas modales estimadas

Las propiedades dinámicas de la Torre Peñuelas se estimaron utilizando el método Subspace System Identification (SSI) [5] y el método Frequency Domain Decomposition [6]. Ambas técnicas de identificación de sistemas muestran resultados similares.