

Sistema de Instrumentación Sísmica

La instrumentación sísmica de la Torre Peñuelas se logró con un SISBC compuesto por acelerógrafos Raspberry Shake® RS4D-V8 [7]. El sistema fue diseñado para continuar las mediciones aunque se corte el suministro de energía, mediante el uso de una batería de 12V 55Ah. Los instrumentos R4SD van acompañados de una computadora portátil Raspberry Pi 3 Modelo B (RPi3) que adquiere los datos de los sensores y permite las comunicaciones a través de Internet o una red local. Finalmente, se conectó un sensor barométrico BME280 al RPi3, lo que permite registrar la presión barométrica, la humedad relativa y la temperatura en tiempo real.

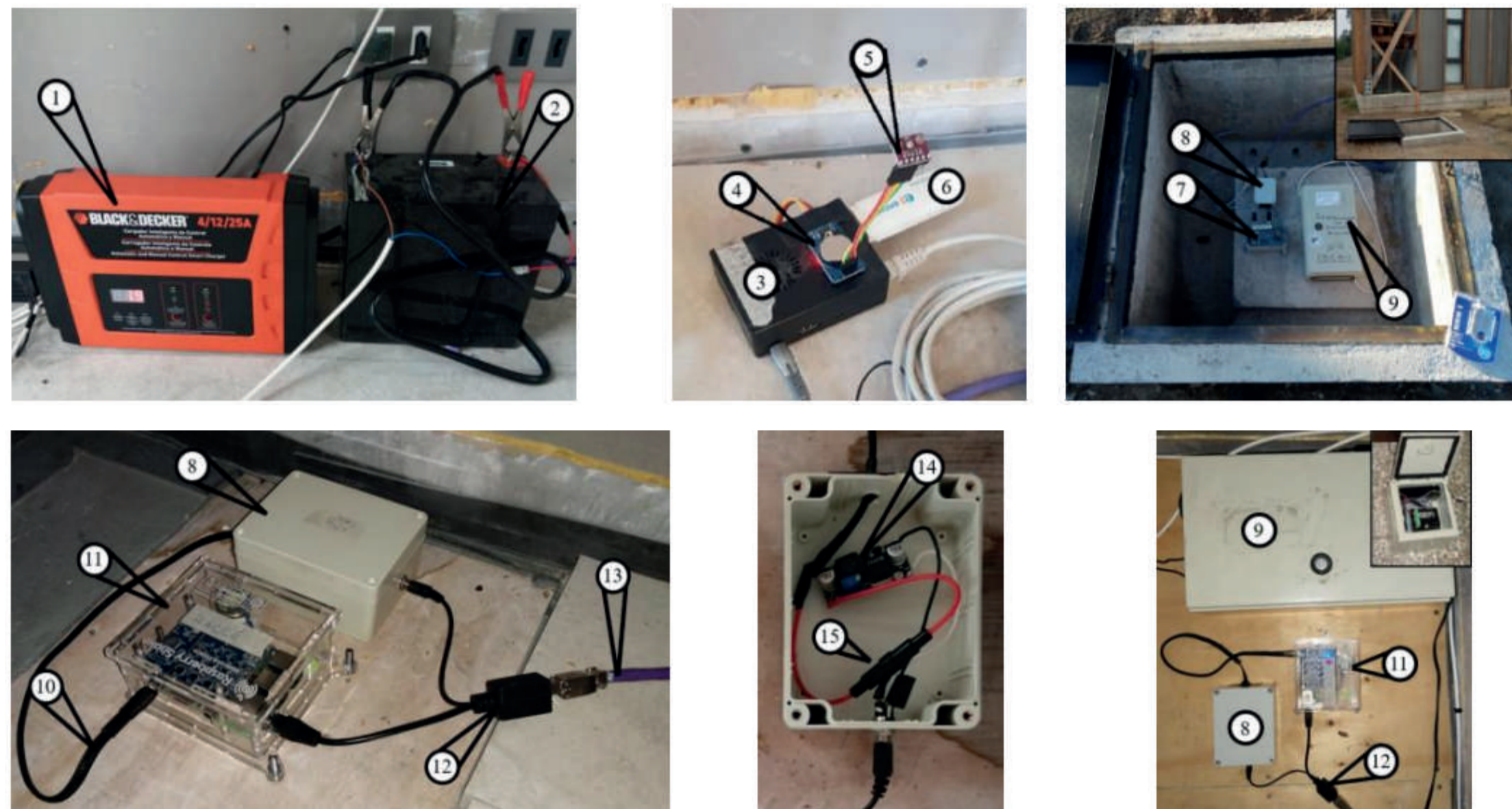


Figura 5: Fotografías de los equipos instalados: (1) Cargador de batería BC25-B2C; (2) Batería KBL12260W 12v 55Ah; (3) Raspberry Pi 3 servidor local; (4) Reloj de precisión DS3231; (5) Sensor barométrico BME280; (6) Internet Móvil; (7) Acelerógrafo RS4D-V8 Modelo Outdoor; (8) Transformador de voltaje personalizado; (9) Acelerógrafo QDR; (10) Micro-USB; (11) Acelerógrafo RS4D-V8 modelo Indoor; (12) PoE splitter; (13) Cable UTP CAT6 TRIMERX; (14) Módulo step-down LM2596S 3A; (15) Portafusibles

SISBC: Validación y Sensibilidad

Se compararon los R4SD con acelerómetros Episensor ES-U2, mediante ensayos de mesa vibratoria realizados en la Universidad de Chile. Se determinó una gran coherencia entre los registros. Se concluyó que el SISBC es preciso para frecuencias de hasta 25 Hz.

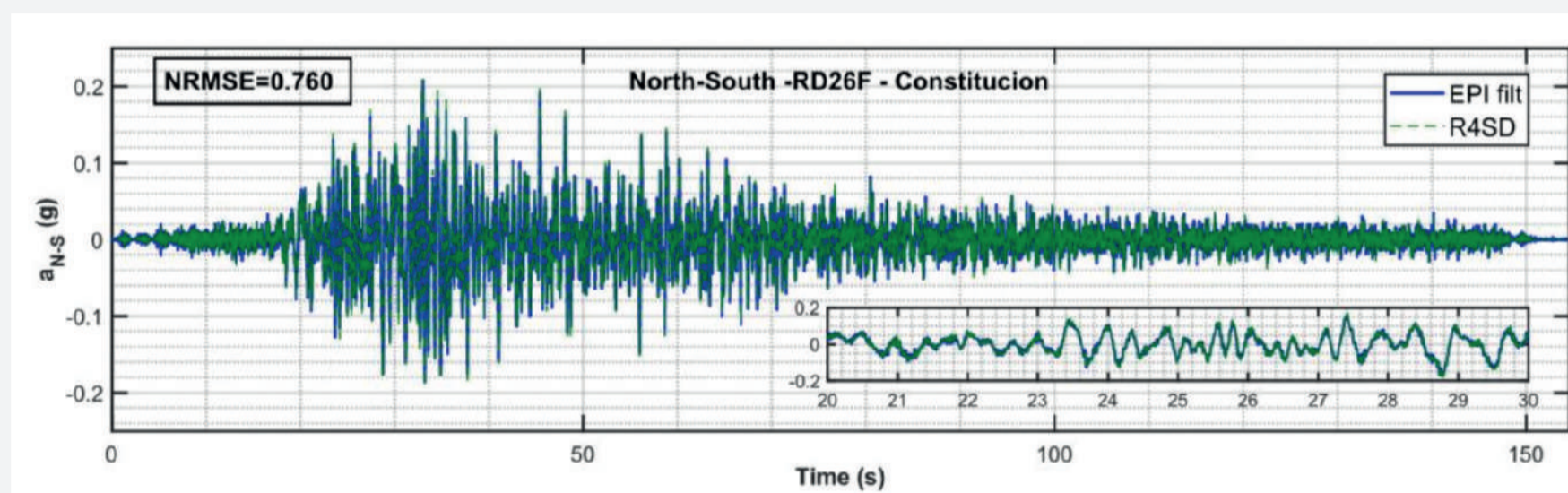


Figura 6: Comparación de registros entre Episensor® ES-U2 y acelerómetros R4SD V8. Señales fueron filtradas con un paso bajo Butterworth N=12 a 25 Hz.

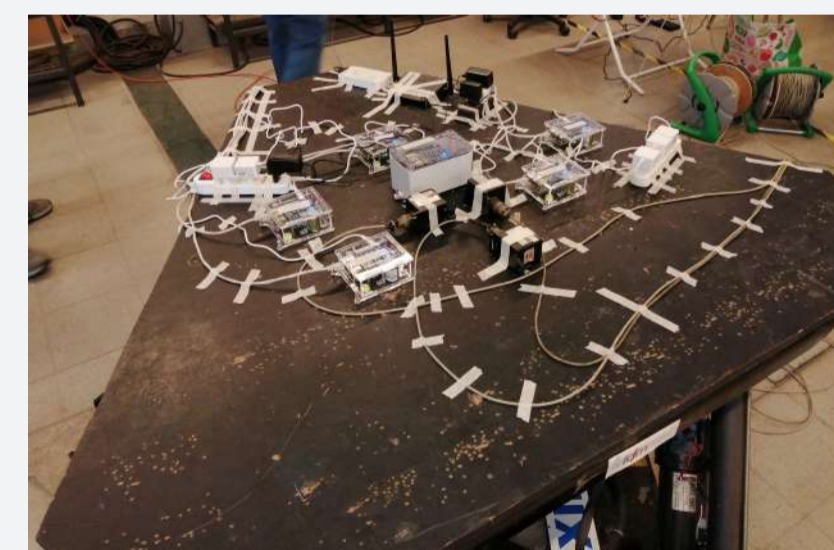


Figura 7: Ensayo de mesa vibratoria.

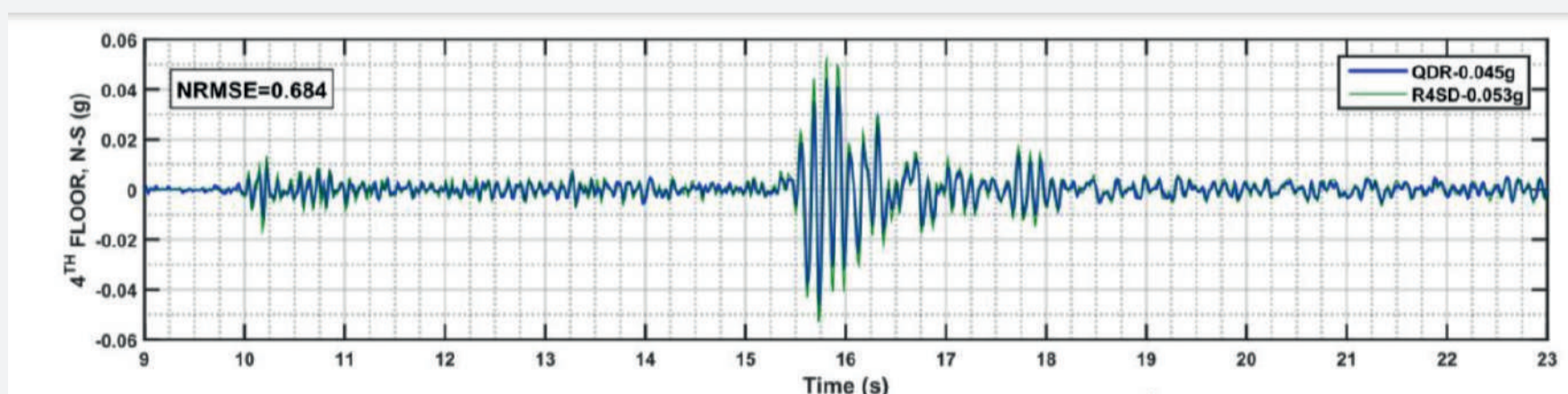


Figura 8: Primer registro sísmico grabado en la Torre Peñuelas Instrumentos ubicados en el cuarto piso, dirección N-S.

El 23 de octubre de 2021 el SISBC registró el primer evento sísmico en la torre Peñuelas, un evento sísmico Mw=4,6 que ocurrió a 22 km al noroeste de la ciudad de El Tabo, Chile. Permitiendo comparar los equipos R4SD y QDR.

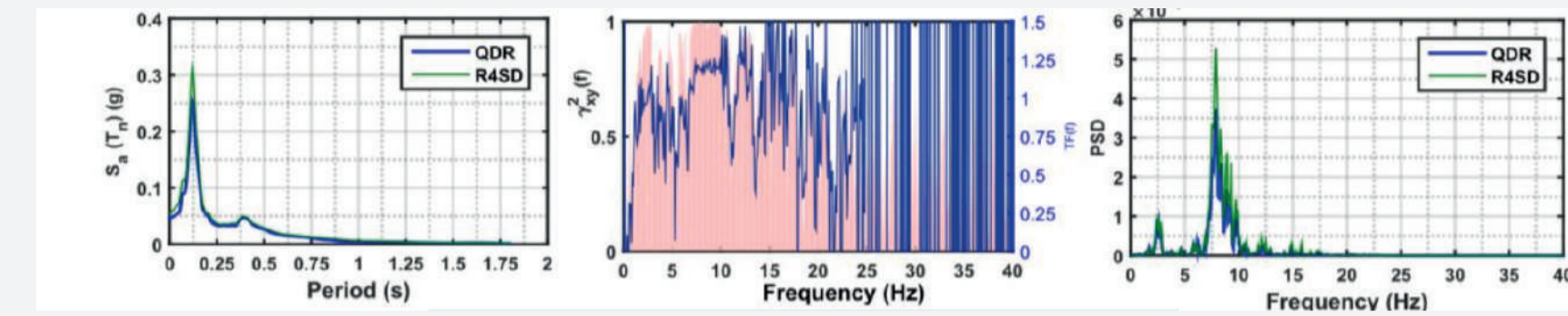


Figura 9: Comparación de Registros Sísmicos R4SD vs QDR, 4to Piso Norte-Sur, evento sísmico 23/10/2021 Mw=4.6.

Ambos clases de sensores exhibieron un contenido de frecuencia similar al observar que la señal estaba gobernada por componentes de alta frecuencia (~ 7-10 Hz). La función de coherencia y transferencia se volvió consistente cuando el Espectro de Potencia mostró energía relevante y se volvió incoherente para frecuencias que no estaban contenidas en la señal grabada.

Monitoreo de Salud Estructural

Basado en el SISBC descrito, se implementó un sistema de monitoreo de la salud estructural de la Torre Peñuelas. Los datos de vibraciones ambientales se procesan utilizando el método FDD [6]. El algoritmo estima las tres primeras frecuencias naturales de la Torre en intervalos de 1 hora. Simultáneamente, esta rutina llama al sensor BME280 para evaluar la temperatura actual y la humedad relativa.

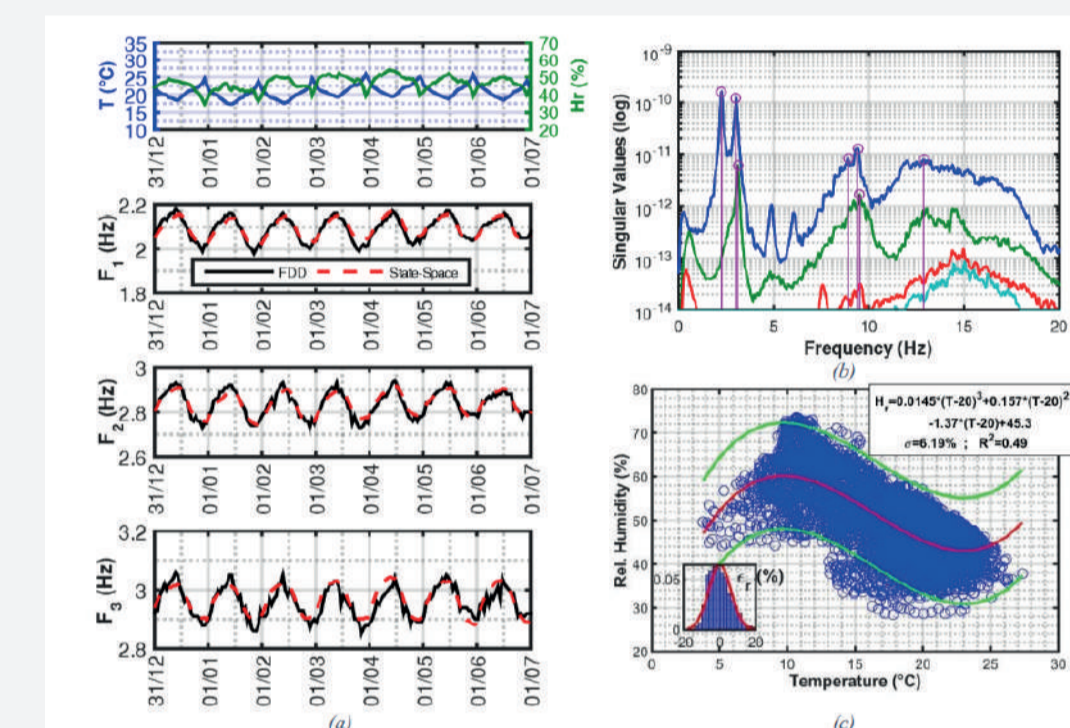


Figura 10 : (a) Temperatura, humedad relativa y frecuencias naturales identificadas a partir del método FDD durante la primera semana de 2022. (b) Método FDD obtenidos de geófonos R4SD, (c) Relación Hr vs T al interior de la Torre Peñuelas.

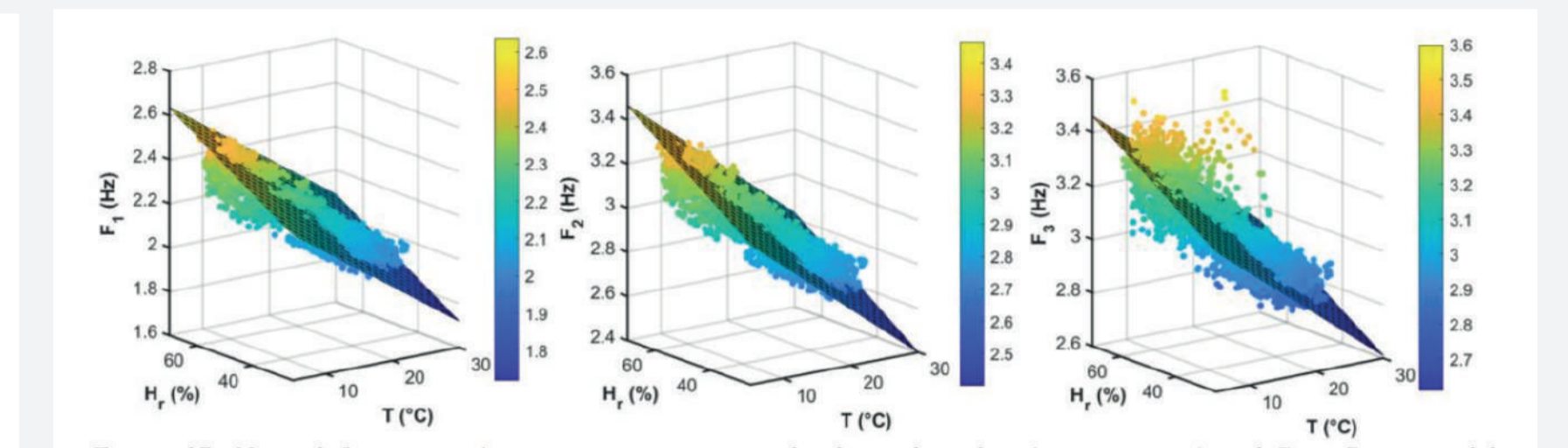


Figura 11: Frecuencia natural v/s temperatura instantánea y humedad relativa (puntos de dispersión) y estimación del modelo espacio-estado asumiendo parámetros ambientales permanentes (supuesto estático)

Basado en el hecho de que las frecuencias naturales dependen de ambos parámetros ambientales (T y Hr) y observando que estas frecuencias naturales parecen depender de la historia de estos parámetros, un modelo dinámico espacio-estado en el subespacio de tiempo discreto (función n4sid de MATLAB) se ajustó para estimar cada frecuencia natural en función de los datos de las últimas 24 horas relacionados con la temperatura interna y la humedad relativa.

Conclusiones

- Las frecuencias naturales aumentan en ambientes húmedos y fríos. La variación diaria peak-to-peak de las frecuencias naturales fue tan significativa como 9.5-10.9%. Asimismo, se observó una variación del 25,2-29% de los valores extremos de las frecuencias naturales durante los siete meses de seguimiento. Por lo tanto, se puede concluir que las propiedades dinámicas de las estructuras de madera podrían ser más susceptibles a las condiciones ambientales que otros sistemas estructurales, considerando este resultado es esperable en base a la naturaleza orgánica e higroscópica de la madera.
- Si bien se esperaba medir una respuesta más rígida por parte de la estructura de madera en condiciones de frío, fue inesperado encontrar frecuencias más altas en un ambiente húmedo [8]. Una razón para este hallazgo contrario a la intuición puede atribuirse al apriete de las conexiones metálicas producto de la hinchazón de la madera.
- Finalmente, se encontró que los modelos espacio-estado pueden usarse para desagregar el efecto de las condiciones ambientales, permitiendo la implementación de un sistema de Monitoreo de Salud Estructural para rastrear variaciones de propiedades dinámicas debido a otras fuentes (por ejemplo, daño debido a cargas sísmicas).

Referencias

[1] H. Svatoš-Ražnjević, L. Orozco, A. Menges, Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021, Buildings, 12 (2022) 404. <https://doi.org/10.3390/buildings12040404>.
 [2] J.W. van de Lindt, S. Pei, S.E. Pryor, H. Shimizu, H. Isoda, Experimental seismic response of a full-scale six-story light-frame wood building, J. Struct. Eng. 136 (2010) 1262–1272. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000222](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000222).
 [3] J.J. Ugarte, E. Wiegand, J. Montaña, S. Cárcamo, C. Delucchi, Light frame timber tower: Interdisciplinary design of prefabricated and anti-seismic 5-story experimental building, WCTE 2018 - World Conf. Timber Eng. (2018).
 [4] U. Force, B. Accelerometer, ES-U2 Uniaxial Force Balance Accelerometer, (n.d.).
 [5] P. Van Overschee, B. De Moor, Subspace Identification for Linear System: Theory - Implementation - Applications, Kluwer Academic Publishers, 1996.
 [6] P. Brincker, Rune; Ventura, C. E.; Andersen, Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition, in: IMAC 19 A Conf. Struct. Dyn., Kissimmee, Florida, 2001: pp. 698–703.
 [7] Raspberry Shake, Raspberry Shake Main Page, (2022). <https://rasberryshake.org>.
 [8] T. Yipintsoi, Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, 2010. <https://doi.org/10.1161/01.RES.39.4.523>.