

SISTEMA AUTOMÁTICO DE MONITOREO DE EVENTOS Y MOVIMIENTO FUERTE

R. Boroschek⁽¹⁾, C. Poblete⁽²⁾, A. Aguilar⁽³⁾

⁽¹⁾ Gerente General, Rubén Boroschek y Asociados, gerencia@rba-global.com

⁽²⁾ Ingeniero, Rubén Boroschek y Asociados, carlos.poblete@rba-global.com

⁽³⁾ Ingeniero, Rubén Boroschek y Asociados, antonio.aguilar@rba-global.com

Resumen

El aumento de la capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos ha permitido durante los últimos años diseñar sistemas capaces de registrar y reportar eventos sísmicos o similares casi en tiempo real, permitiendo el monitoreo continuo de vibraciones y propiedades dinámicas de una estructura o del suelo mediante la instalación de sensores y equipos de adquisición. El principal objetivo de este tipo de sistemas es la generación de un diagnóstico del estado de una estructura ante diversas condiciones ambientales (normales o extremas como sismos) y de uso. Además, el acceso a medios de difusión ha permitido que los sistemas de monitoreo, generen alertas automáticas para movimientos fuertes: sismos, tronaduras, explosiones, etc. La alerta es enviada a destinatarios determinados a través de medios de comunicación remotos (e-mail, SMS, Twitter, publicación online, etc.) o utilizada en la automatización de procesos. En este artículo se presentan la aplicación de estos sistemas en cuatro edificios en Chile. El sistema implementado entrega información como registros de aceleración, valores extremos de aceleración, velocidad y desplazamiento, Intensidad Instrumental, Espectros de demanda en aceleración, velocidad y desplazamiento, y una gran cantidad de información útil tanto para el usuario no instruido (como niveles de percepción empírica), como para profesionales e interesados en los aspectos operacionales de las estructuras civiles, industriales o geomecánicas.

Palabras Clave: Estado de Salud, SHM, Daño Estructural, Alerta, Monitoreo Remoto.

Abstract

The increase in storage capacity and data processing in recent years has allowed to design systems that are able to record and report seismic (or similar) events in near real time, allowing a continuous vibration monitoring and dynamic properties monitoring of a structure or ground by installing sensors and equipment acquisition. The main objective is to generate a structure state diagnosis due to various environmental and use conditions. In addition, the access to media communication, has allowed the monitoring systems the automatic generation of strong motion alerts, for events like: earthquakes, blasts, explosions, etc. The alert is sent to the selected recipients through varied remote communication media (e-mail, SMS, Twitter, website publishing, etc.) or used in process automation. This article describes the application of these systems in four buildings in Chile. The system provides information such as PGA, PGV, Instrumental Intensity, acceleration, velocity and displacement demand spectrum, and another useful information for the not instructed user (like empirical perception levels), and for professionals and those interested in the operational aspects of civil, industrial or geo-mechanical structures.

Keywords: State of Health, SHM, SMA, Structural Damage, Alert, Remote Monitoring

1 Introducción

La instrumentación sísmica de una estructura permite captar información de las deformaciones, fuerzas, aceleraciones, velocidades, desplazamientos entre otros, en un amplio rango, desde microvibraciones hasta movimientos sísmicos de gran magnitud según la calibración del instrumento. La capacidad de los sistemas de adquisición y de los computadores actuales permite captar, procesar y almacenar los datos entregados por los sensores, y así conocer las características de la respuesta de una estructura en muy poco tiempo y de manera remota.

En general el objetivo de la instrumentación es mejorar el entendimiento del comportamiento de una estructura y el potencial daño que puede sufrir ante acciones generadas por un sismo u algún otro evento extremo.

Una buena instrumentación puede proveer información para reconstruir la respuesta del edificio de forma detallada y así correlacionarla con su modelo numérico. Además, permite estudiar la importancia del comportamiento no-lineal en la respuesta y como se relaciona con el daño sufrido por este o determinar si los parámetros del suelo afectan la respuesta del edificio. De esta manera es posible evaluar la efectividad de los procedimientos de análisis, diseño y de la normas y proponerle futuros cambios basados en datos reales.

Tener edificios instrumentados en caso de terremotos sirve para acercar nuestro entendimiento sobre la respuesta real del edificio y así contribuir al proceso de refuerzo si es necesario, siendo esto de gran importancia para los propietarios del edificio. En general aumentar la experiencia del país en instrumentación sísmica logrará desarrollar nuevas y mejores técnicas en el diseño y en los métodos constructivos utilizados.

A nivel mundial existen varias agrupaciones que realizan este tipo de actividad. Son de destacar los casos desarrollados por la Universidad de Porto (Magalhaes F: [1]), Universidad de British Columbia (BCSIMS: [2]), el sistema inteligente para edificios REFLEXX (Naeim F: [3]) y la red desarrollada por la Universidad de Chile. En el presente trabajo se presenta el desarrollo y el resultado de la aplicación práctica de este tipo sistema y la respuesta de los edificios bajo el sismo $Mw=6.2$ del 23 de Agosto de 2014 en la zona central y algunos sismos menores en la zona norte (ver Tabla 2).

2 Sistema de monitoreo

Los avances en el desarrollo de sensores de aceleración, digitalizadores, procesadores y redes de comunicación inalámbrica permiten el desarrollo de un sistema de monitoreo de bajo costo y de fácil instalación.

Según las características que deseé evaluar el usuario, el sistema puede ser configurado para detectar parámetros de interés ingenieril como: PGA, PGV, PGD, duración del sismo, espectros de respuesta, intensidad de arias, etc. Y otros de interés general como la intensidad instrumental correlacionada con la intensidad de Mercalli Modificada.

Los parámetros de interés son determinados automáticamente a partir del registro de las vibraciones básicas de la estructura. Con esta información es posible enviar alertas y alarmas una vez superados umbrales determinados en dichos parámetros. El envío de la información se realiza mediante Internet utilizando e-mail, subida a la web y twitter, como de redes inalámbricas más robustas (SMS). En la experiencia la información es obtenida minutos después del término del evento.

Los sistemas de monitoreo automático desarrollados e implementados durante los últimos años se enfocan principalmente en cuatro tipos de reconocimiento:

- A. Monitoreo de salud estructural (SHM): Utilizando como entrada microvibraciones y eventos sísmicos es posible detectar cambios en los parámetros dinámicos de una estructura y asociarlos a posibles modificaciones, deterioro o daños ocurridos en sus elementos.
- B. Alertas de movimiento fuerte (SMA): Mediante acelerómetros de amplio rango dinámico se genera una red de detección de eventos de movimiento fuerte, ya sea a nivel de suelo o en la estructura. Bajo este tipo de instrumentación se ha desarrollado redes de monitoreo donde cada instrumento está geo-referenciado y en donde los distintos niveles alcanzados por los parámetros monitoreados definen distintos niveles de alertas y/o alarmas. Se envían informes automáticos de los eventos registrados y se despliega la información en una página Web. Sistemas como este han sido ampliamente implementados en el sector minero.
- C. Evaluación del desempeño de sistemas de aislación y disipación: Mediante la instrumentación en elementos ubicados bajo y sobre una interfaz de aislación es posible comparar las diferencias en la respuesta, antes eventos de distintas características debido al carácter no lineal de estos sistemas y lo que es más importante es posible detectar trabamientos que tenga la interface aislada.
- D. Estado de salud de sistemas (SOH): Mediante la detección de cambios en los parámetros de funcionamiento de un sistema de monitoreo se generan alarmas. Sistemas como estos han sido aplicados en lugares de elevados estándares de seguridad como centrales nucleares. En donde se analizan en tiempo real las variables de salud del sistema de monitoreo instalado. Se controlan variables como temperatura, voltaje, back up, humedad, etc. Las variaciones fuera de control son reportadas automáticamente, pudiendo significar una alerta sobre el funcionamiento del sistema de monitoreo.

3 Ejemplos de Aplicación y Resultados

En este artículo se presentan 4 de las 6 estructuras instrumentadas con el sistema descrito a lo largo del territorio nacional, cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 1. Las estructuras escogidas son edificios en base a muros de hormigón armado, una de ellas con sistemas de aislación sísmica

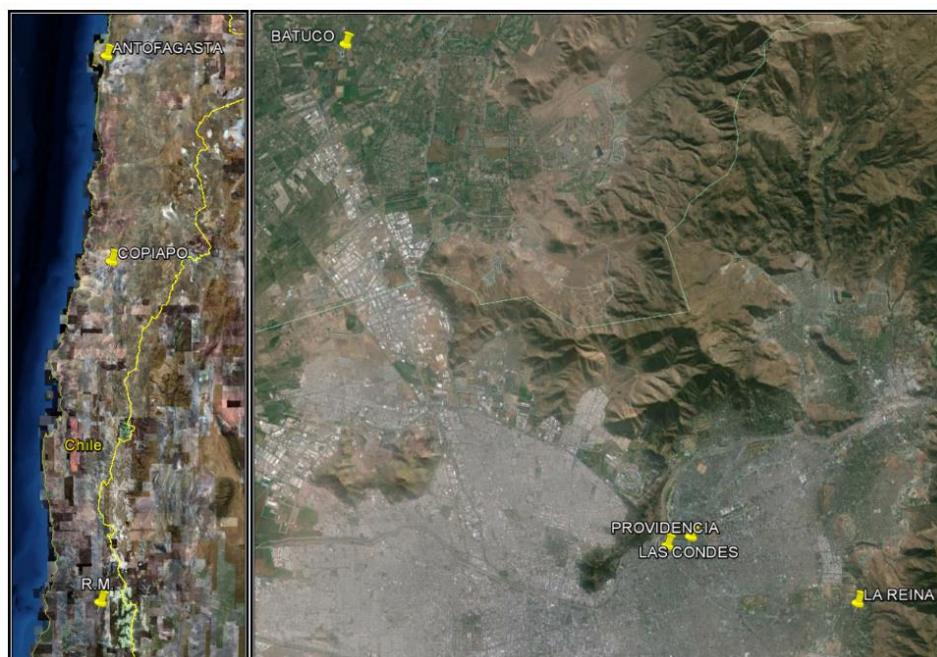


Figura 1 - Mapa de localización estructuras instrumentadas

En ellas se instalaron sensores triaxiales de aceleración de bajo costo de tipo MEM llamado RBA-A1, conectados mediante cables a un ordenador. Se desarrolló el software RBA-DAQ-EQ para adquirir registros de eventos de movimiento fuerte sobre un nivel establecido de disparo (por defecto a 1% [g]). El ordenador es controlado de manera remota por Internet.

El computador queda protegido por un gabinete de equipos eléctricos y con respaldo de energía, el cual recibe los cables de energía eléctrica (220V AC).

3.1 Edificio oficinas Rene Lagos Engineers

Corresponde a una estructura de 24 pisos y 7 subterráneos, ubicada en la comuna de Las Condes. Tiene como objetivo identificar deterioro por sismo, además de registrar y alertar eventos de movimiento fuerte.

Se instaló acelerómetro tri-axial en el piso 24 junto con el respectivo software de monitoreo. De forma permanente, el sistema evalúa el registro continuo de aceleraciones e identifica los eventos ocurridos. Una vez registrado, se envía el evento al sistema de procesamiento central, el cual se encarga de la difusión del reporte automático a los interesados.

La Imagen A de la Figura 2 muestra las aceleraciones en las tres direcciones registradas en esta estructura para el sismo del 23 de agosto del 2014 de 6.4 magnitud momento con epicentro en la quinta región. La Imagen B de la Figura 2 muestra las aceleraciones, velocidades y desplazamientos horizontales del canal NS registrados con sus máximos valores, PGA, PGV y PGD correspondientemente, para obtenerlos los registros fueron corregidos utilizando en este caso en particular un filtro pasabanda entre 0.35 y 20 Hz. Estas figuras fueron enviadas vía e-mail 5 minutos después del término del evento. La aceleración y velocidad máxima observada fue de 0.044[g] y 4.2 [cm/s] respectivamente. La duración del movimiento fuerte fue de 50 segundos.

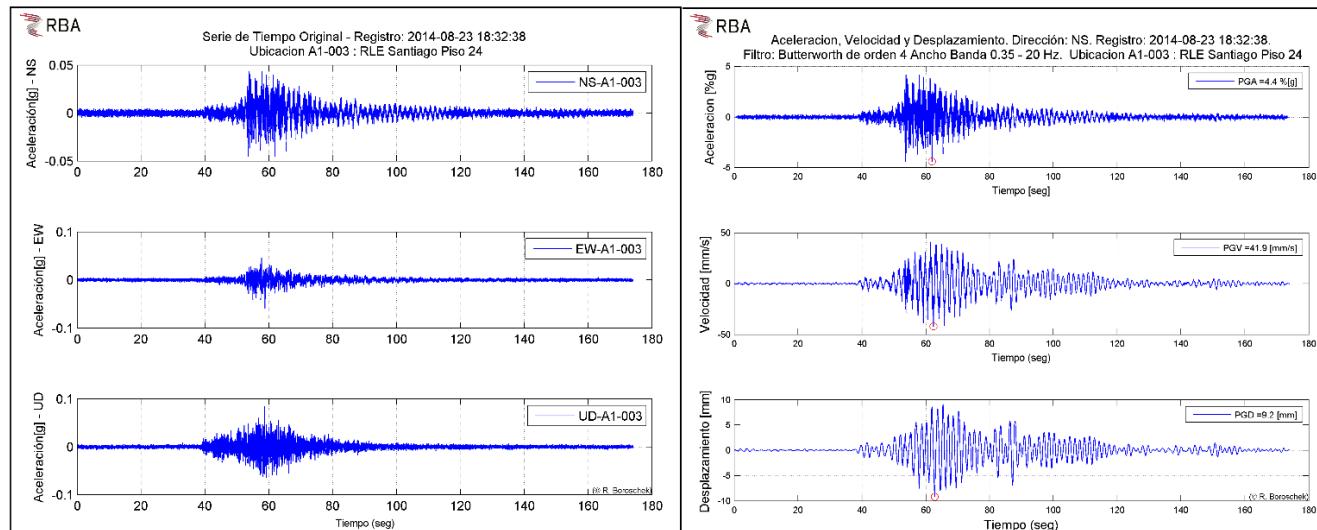


Figura 2 - Sismo 23 de Agosto Mw=6.4 - sensor Edificio RLE piso 24.

El contenido de frecuencias de la respuesta ante este sismo se muestra en el espectrograma de la Figura 3. Se observa la excitación de al menos tres modos de vibrar.

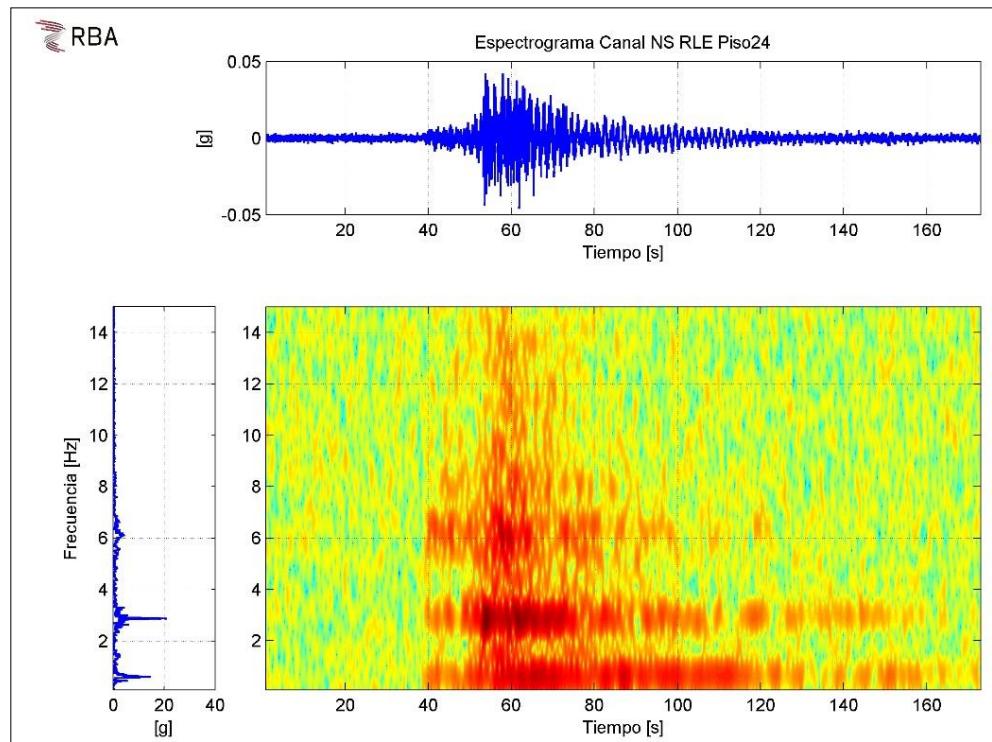


Figura 3 – Espectrograma Sismo 23 de Agosto Mw=6.4 - sensor Edificio RLE piso 24

Los espectros de respuesta de varios registros obtenidos en este edificio y para distintos sismos se presentan en la Figura 4. Es fácil notar los periodos de vibrar del edificio, se observa la excitación de modos superiores y del periodo fundamental de la estructura correspondiente a 1.67 segundos, estos han sido similares en los registros obtenidos anteriormente en este edificio lo que verifica la invariancia del sistema.

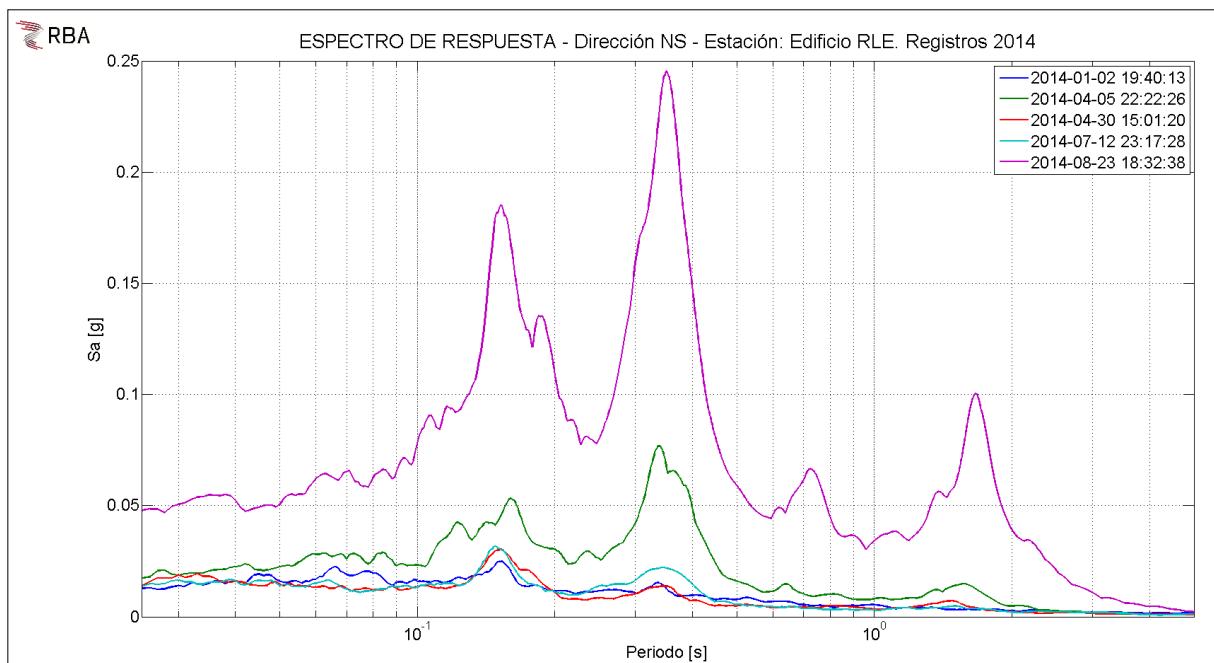


Figura 4 - Espectros de respuesta piso 24 edificio RLE.

3.2 Edificio oficinas de RBA

Es una estructura de 10 pisos y 1 subterráneo ubicado en la comuna de Providencia. Posee dos sistemas de monitoreo: SMA y de SHM.

El monitoreo de SHM registra la respuesta de la estructura ante vibraciones ambientales utilizando acelerómetros uniaxiales analógicos de fuerza balanceada de bajo nivel de ruido y una tarjeta de adquisición de 24 bits. La Figura 5 muestra la evolución de frecuencias en el tiempo del edificio. Frecuencias y Amortiguamientos son actualizados en la Web cada 15 minutos.

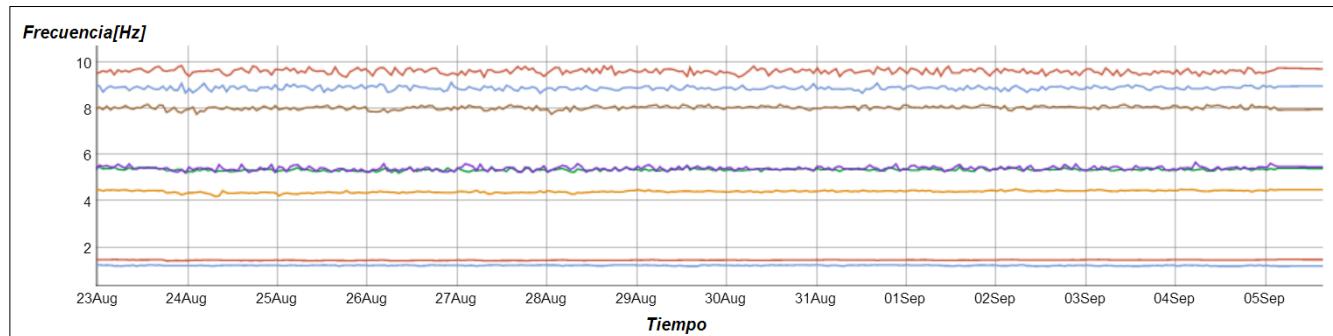


Figura 5 - Evolución de frecuencias en el tiempo edificio oficinas RBA

La medición constante de estos parámetros permite comparar la respuesta de la estructura cuanto es solicitada por vibraciones ambientales y por vibraciones generadas por un sismo. Análisis de este tipo permitirán identificar posibles cambios en las propiedades modales, para finalmente correlacionar y cuantificar el posible daño. Por ejemplo luego de ocurrido el temblor del 23 de Agosto no se observaron modificación de las frecuencias del edificio, indicando la ausencia de un deterioro importancia. Estudios de este tipo han sido aplicados por ejemplo en el edificio de la CCHC (Carreño R., Boroschek R.: [4]) y en el edificio Titanium La Portada (Nuñez T., Boroschek R.: [5]).

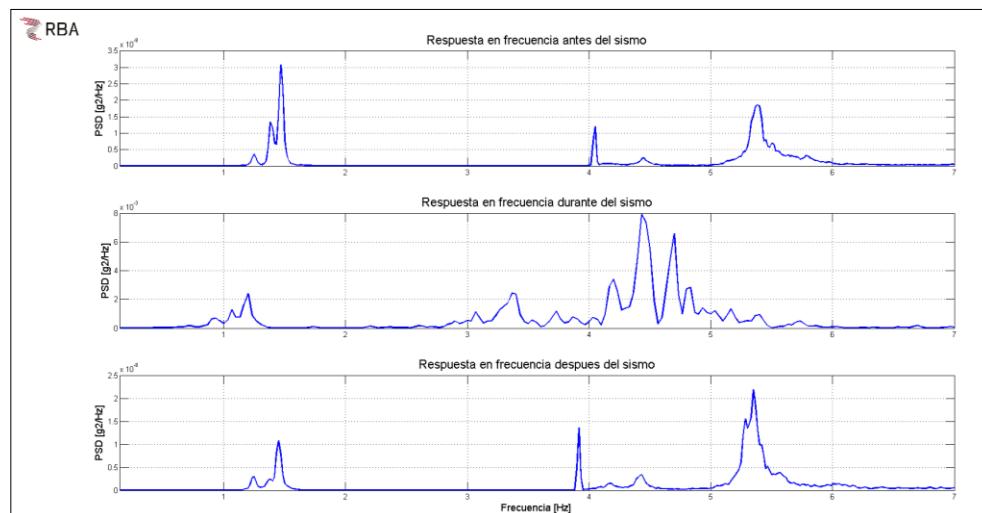


Figura 6 - Comparación de respuesta en frecuencia edificio RBA dirección NS

La Figura 6 muestra la respuesta en frecuencia del edificio RBA en la dirección NS entre 0.15 [Hz] y 7[Hz] en los intervalos:

- Antes del sismo: midiendo la respuesta durante 15 minutos de vibraciones ambientales. Se observa la frecuencia fundamental de vibrar de 1.2 [Hz].

- Durante el sismo: midiendo la respuesta durante los 120 segundos del evento. La respuesta de la estructura se ve afectada por la excitación de frecuencias del sismo, de igual forma se observa la frecuencia fundamental del edificio.
- Despues del sismo: midiendo la respuesta ante 15 minutos de vibraciones ambientales. La estructura vuelve a responder en sus modos de vibrar, con una frecuencia fundamental que se mantuvo en 1.2[Hz]

Por otro lado el monitoreo de SMA cuenta con dos acelerómetros triaxiales RBA-A1 que notifican vía SMS y email las características de los eventos y la respuesta registrada. Están localizados en los niveles 4 y 10 del edificio. La Figura 7 muestra la componente horizontal Este-Oeste (EW) de ambos sensores para el sismo del 23 de agosto del 2014 de 6.4 Mw. La integración y los espectros de respuesta fueron calculados en forma automática por el sistema. Estas figuras fueron enviadas vía e-mail 5 minutos después del término del evento.

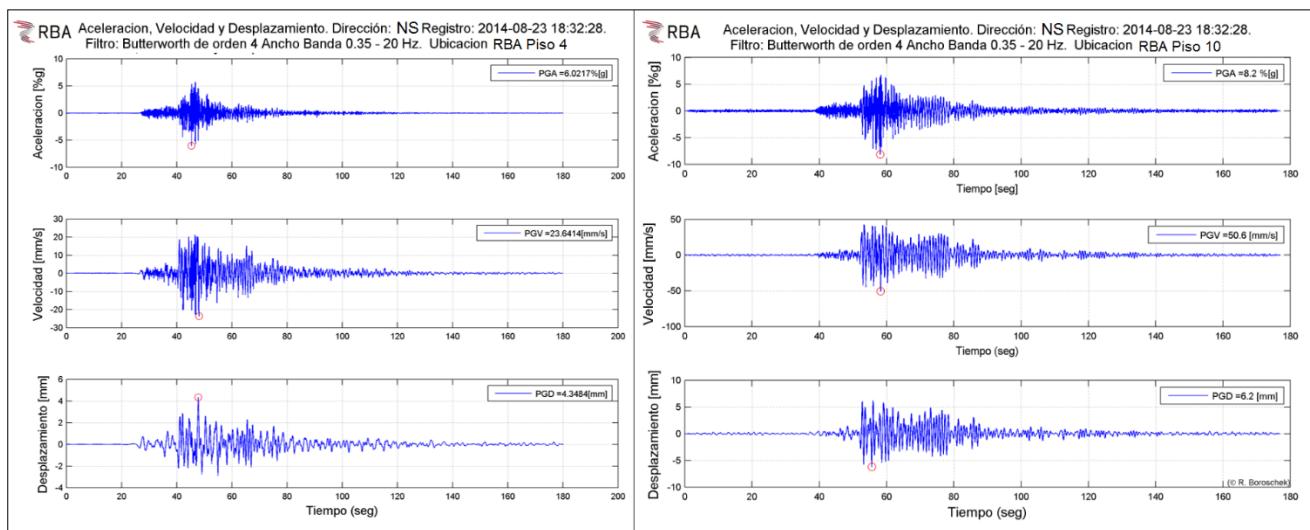


Figura 7 - Sismo 23 de Agosto Mw=6.4 - sensor ubicado en Providencia

La Instrumentación en altura permite comparar las características de la respuesta medida en distintos niveles. Se determinan parámetros como aceleración, velocidad y desplazamiento máximo, duración, etc. La Tabla 1 muestra un resumen de esta comparación. La duración del movimiento fuerte fue de 45 segundos. El contenido de frecuencias de la respuesta ante este sismo se muestra en el espectrograma de la Figura 8.

Del cálculo de espectros de respuesta, Figura 9, es fácil observar los periodos de vibrar del edificio, los cuales son 0.83 [s] dirección NS y 0.70 [s] dirección EW. Es interesante notar la gran diferencia de las aceleraciones entre ambos niveles y la modulación de la respuesta en el segundo 65 a 70 del registro.

Tabla 1 - Comparación respuesta de la estructura en distintos niveles

Oficinas RBA	PGA [g]	PGV [mm/s]	PGD [mm]
Piso 04	6 %	24	4
Piso 10	8 %	51	6

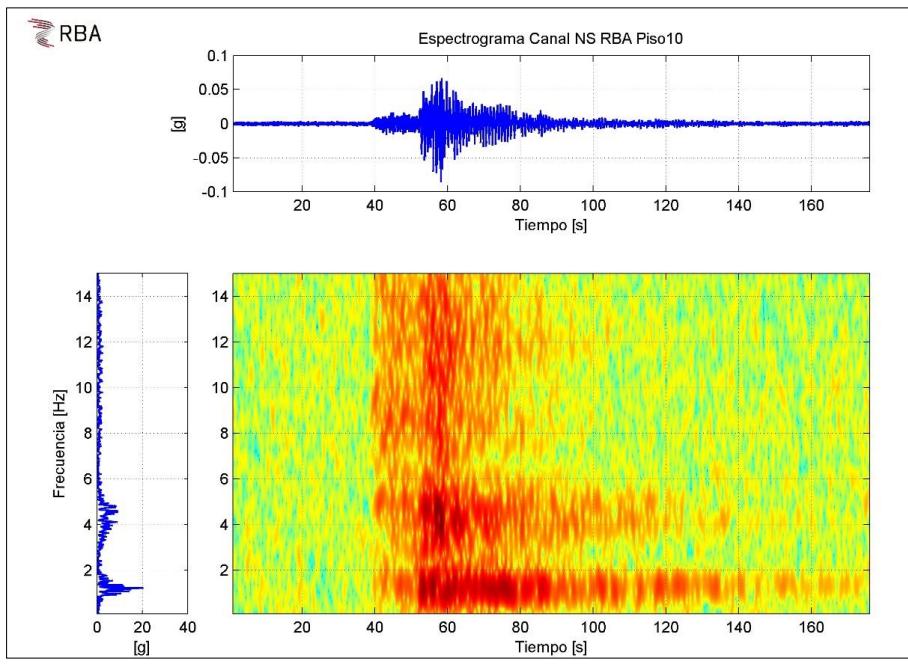


Figura 8 – Espectrograma Sismo 23 de Agosto Mw=6.4 - sensor Edificio RBA piso 10

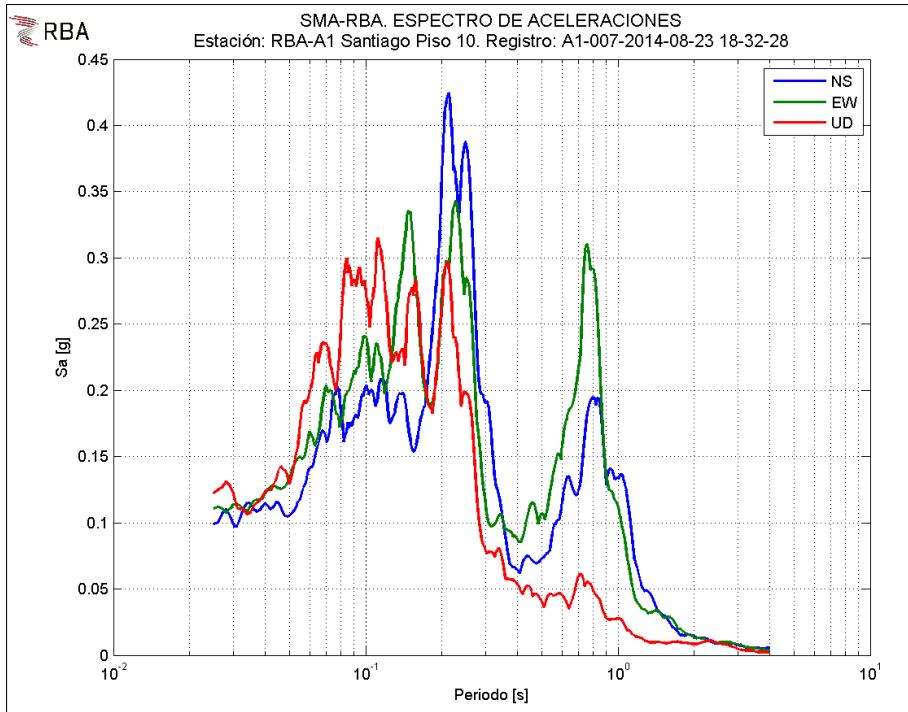


Figura 9 – Espectros de respuesta Sismo 23 de Agosto Mw=6.4 - sensor edificio RBA Piso 10

3.3 Estructura Aislada Data Center de Claro.

La estructura posee dos pisos y tiene su interfaz de aislación en el nivel -1. El sistema de aislación sísmica utilizado para este proyecto consiste en apoyos elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

Se instalaron cuatro sensores triaxiales de aceleración RBA-A1, tres de ellos sobre la interfaz de aislación y uno bajo ella. El día del evento sólo se encontraba en operación uno de los sensores del suelo.

Los objetivos de esta instrumentación son:

1. Registrar la respuesta sísmica de la estructura
2. Identificar los períodos y amortiguamientos principales de la estructura.
3. Determinar los movimientos del sistema de aislación.
4. Verificar que no se modifique la interfaz de aislación por trabamiento u otros.
5. Verificar los criterios de análisis y diseño de la estructura
6. Identificar las características de los movimientos a nivel de terreno.

La Figura 10 muestra las aceleraciones en las tres direcciones de uno de los sensores y el espectro de respuesta para el sismo. La aceleración máxima a nivel de terreno fue de 0.063[g]. La duración del movimiento fuerte fue de 40 [s]. Del cálculo de espectros de respuesta, Figura 10, es fácil notar los períodos del suelo cercanos a 0.7 [s]. Este evento sísmico generó una Intensidad Instrumental de V.

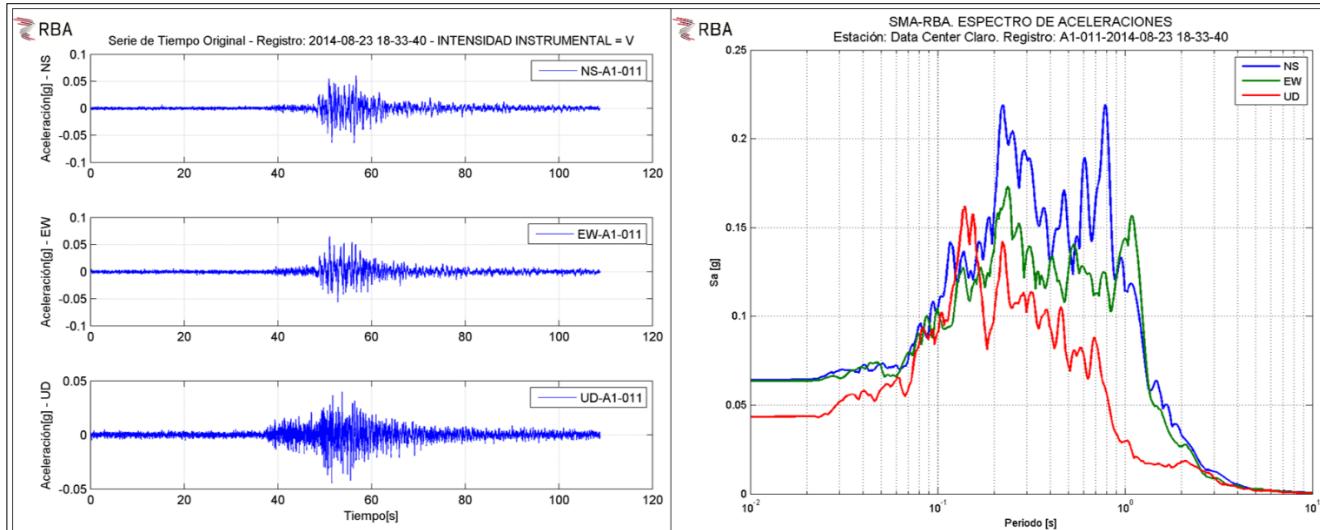


Figura 10 - Sismo 23 de Agosto Mw=6.4 - sensor ubicado en Batuco

3.4 Edificio en Copiapó

La estructura del Edificio Torre del Sol Copiapó consta de dieciséis pisos más tres subterráneos. El Edificio posee un sistema de aislación sísmica ubicado a nivel de cielo del tercer subterráneo. El sistema de aislación se apoya directamente sobre las fundaciones de la estructura y consiste en apoyos elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

Se instalaron cuatro sensores, uno bajo la interfaz de aislación de manera de conocer el input de la estructura y tres sobre la aislación, distribuidos para lograr representar la respuesta del edificio aislado. Un esquema del edificio y de su instrumentación se muestra en la Figura 11.

El objetivo de esta instrumentación es:

1. Registrar la respuesta sísmica de la estructura
2. Identificar los períodos y amortiguamientos principales de la estructura.
3. Determinar los movimientos del sistema de aislación.
4. Verificar que no se modifique la interfaz de aislación por trabamiento u otros.
5. Verificar los criterios de análisis y diseño de la estructura
6. Identificar las características de los movimientos a nivel de terreno.

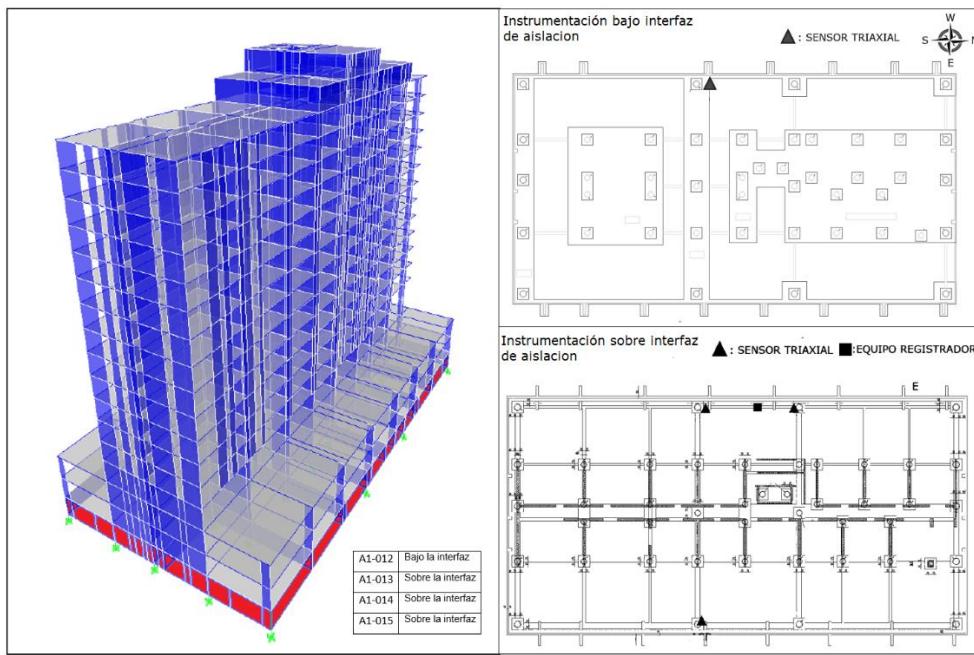


Figura 11 - Esquema instrumentación edificio Copiapo

La Figura 12 muestra las aceleraciones registradas y el espectro de respuesta del sensor ubicado en suelo bajo el edificio para el sismo del 13-06-2014 a las 01:39:01 (ver Tabla 2), el cual tuvo una aceleración máxima de un 2% de [g] y una intensidad instrumental de IV. Este evento generó aceleraciones levemente sobre el nivel de ruido del sensor. A pesar de esto es la identificación de propiedades básicas del registro y la estructura se logró con éxito.

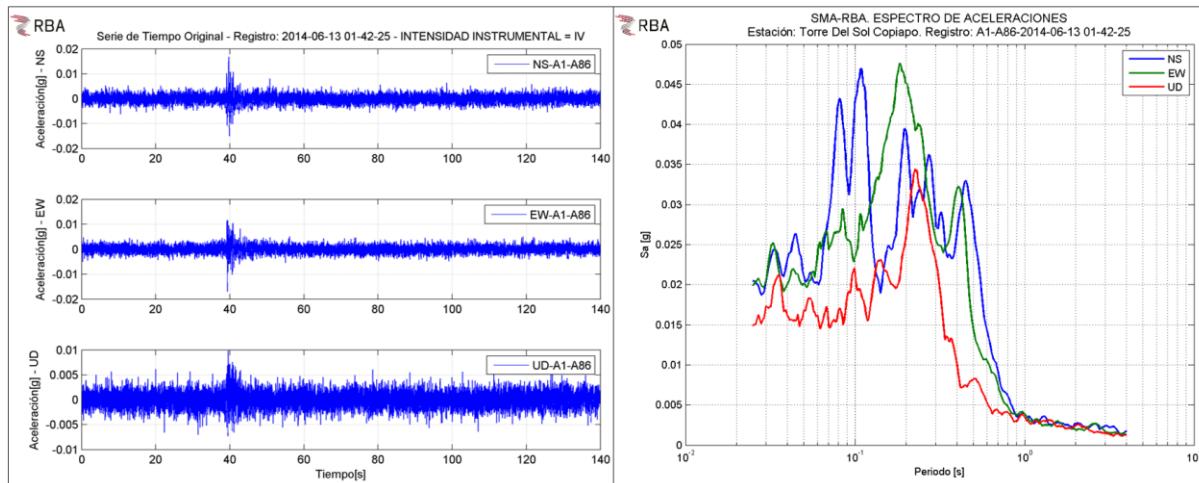


Figura 12 - Sismo 13 de Junio MI=4.8 - sensor ubicado en Copiapo

Con este tipo de instrumentación es posible comparar la respuesta del edificio en diferentes puntos de la estructura, en este caso en lugares de interés para la aislación sísmica. Figuras como Espectro de Densidad de Potencia junto con las funciones de transferencia, fase y correlación (Bendat J & Piersol A: [6]), permiten realizar esta comparación, como se observa en la Figura 13, donde se muestran en diferentes series la respuesta en frecuencia para la dirección horizontal Norte-Sur. En ellas se observa que para el sismo la deformación del sistema fue mínima y que el periodo predominante en el registro es cercano a 3.5 Hz. La ubicación de los sensores se muestra en la Figura 11.

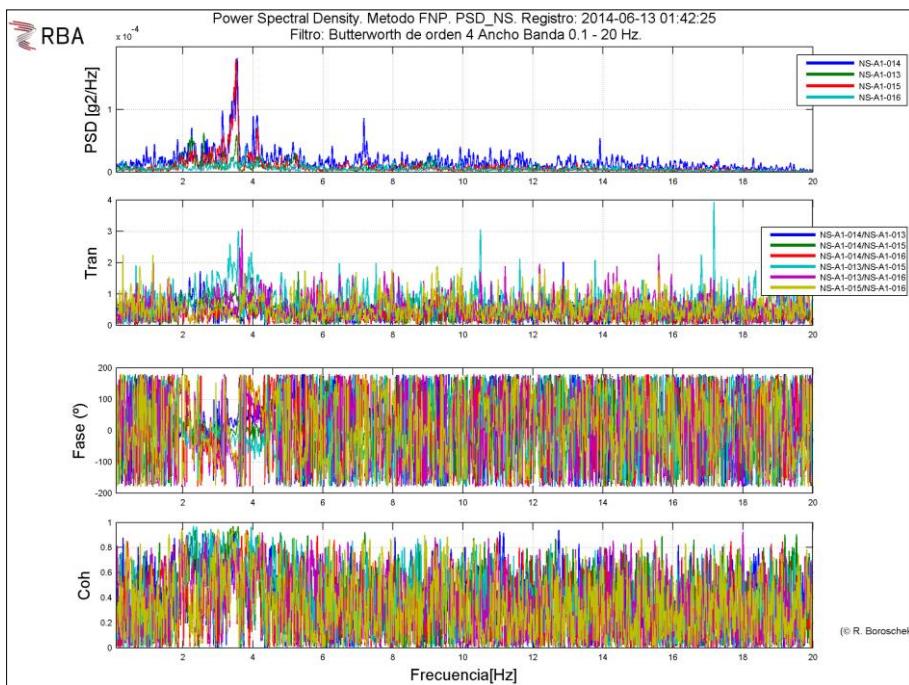


Figura 13 – Espectro Densidad de Potencia direcciones NS - Edificio en Copiapó - Sismo 13 de Junio MI=4.8

4 Resumen de registros

La red de monitoreo presentada en este artículo ha estado operativa y sumando estructuras desde Octubre del 2013. Algunos de los eventos sísmicos registrados se resumen en la Tabla 2 donde además se muestran los datos entregados por el GUC para cada sismo. Los registros y sus procesamientos pueden ser observados en la página: <http://www.shmrba.cl/>

Tabla 2 - Eventos sísmicos red RBA desde 2014

Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora Local	Datos GUC			Datos RBA
		Epicentro	Magnitud	Intensidad Mercalli	PGA
02-01-2014	19:39:44	23Km al NE de Valparaíso	4.9 MI	III Santiago	1%[g] Vertical
05-04-2014	21:22:26	NR	NR	NR	3%[g] Vertical
30-04-2014	14:00:55	50 Km al O de Quillota	5.1 MI	IV Santiago	1.2%[g] Vertical
					1.1%[g] Horizontal EW
13-06-2014	01:39:01	81Km al S de Caldera	4.8 MI	IV Copiapó	2.3%[g] Horizontal EW
12-07-2014	23:16:52	35 Km al E de Valparaíso	4.9 MI	III Santiago	1.7%[g] Vertical
					1.1%[g] Horizontal NS
20-07-2014	02:31:44	54Km al NE de Huasco	4.8 MI	IV Copiapó	1.7%[g] Horizontal NS
23-08-2014	18:32:23	36 Km al N de Valparaíso	6.4 Mw	VI Santiago	8.5%[g] Vertical
					10.6%[g] Horizontal EW
				VI Lampa	6.3%[g] Horizontal EW

5 Conclusiones

Con la nueva tecnología desarrollada es posible realizar el monitoreo sísmico de edificaciones eficiente y más asequible. El sistema desarrollado ha demostrado ser capaz de detectar sismos, procesar las señales registradas en forma automática y así obtener variables importantes para la ingeniería en menos de 5 minutos de terminado el evento. Los procedimientos son posibles debido a la robustez y bajo costo de los modernos acelerómetros y sensores y la capacidad de Internet de conectar los distintos componentes.

El uso masivo en estructura y a nivel de terreno permitirá tener una reacción rápida y efectiva después de un evento sísmico al poder establecer los lugares de mayor severidad del movimiento y las estructuras que sufrieron modificaciones importantes de sus patrones de respuesta.

6 Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos por su colaboración en la implementación de esta red de monitoreo a la oficina de Patricio Bonelli Ingenieros, Rene Lagos Engineers, al equipo técnico y administrativo de Data Center Claro, a la constructora Alcorp con su proyecto Torre del Sol Copiapó y a la constructora Novatec e inmobiliaria Aconcagua por su proyecto Costa Laguna Antofagasta.

7 Referencias

- [1] Magalhaes F. (2010): Operational modal analysis for testing and monitoring of bridges and special structures. PhD Thesis, Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal.
- [2] British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure, UBC Civil Engineering. BCSIMS: British Columbia Smart Infrastructure Monitoring System [en linea] <<http://www.bcsims.ca/>> [consulta : 24 septiembre 2014]
- [3] Naeim F (2012): Real-Time Post-Earthquake Performance Evaluation and Damage Detection for Buildings, 15th World Conference in Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- [4] Carreño R, Boroschek R. (2010): Variación de propiedades dinámicas del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción: caso sísmico. Congreso Chileno de sismología e ingeniería antisísmica 22 al 27 de Mayo de 2010, Valdivia-Santiago, Chile.
- [5] Nuñez T, Boroschek R. (2010): Monitoreo continuo de una estructura en proceso constructivo. Congreso Chileno de sismología e ingeniería antisísmica 22 al 27 de Mayo de 2010, Valdivia-Santiago, Chile.
- [6] Bendat J & Piersol A. (2010): Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition. Wiley Series in Probability and Statistics.