

EL SISTEMA DE ALERTA SISMICA PARA LA CIUDAD DE MEXICO

El Sistema de Alerta Sísmica (SAS), desarrollado en el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), con el apoyo de las autoridades del DF, permite generar en la Ciudad de México señales de alerta ante la ocurrencia de sismos fuertes generados en la costa del estado de Guerrero. El SAS detecta un sismo durante los primeros segundos de su desarrollo mediante un conjunto de 12 estaciones sensoras de campo autónomas. Generalmente, la detección de un sismo fuerte, es señalada consecutivamente por más de dos estaciones. En este caso, cada estación envía desde la costa del estado de Guerrero hasta la ciudad de México, mediante un sistema dual de radiocomunicación disponible las 24 horas del día, información descriptiva de la magnitud del sismo detectado.

Con la información proporcionada por las estaciones, las computadoras redundantes de la Estación Central de registro en el CIRES, estiman la magnitud Richter correspondiente y si esta magnitud supera los 5 grados Richter, genera la señal de alerta correspondiente que se difunde a diferentes usuarios. Cuando la magnitud estimada está entre 5 y 6 grados Richter, se alerta solamente a los usuarios que estén interesados y se disparan las redes de registro acelerográfico instaladas en la Ciudad de México y valle de Toluca. Si la magnitud estima-

da supera los 6 grados Richter, la señal de alerta se envía además de los usuarios anteriores, a todos los usuarios suscritos al sistema en su etapa de evaluación experimental, entre los cuales se cuentan las estaciones radiodifusoras comerciales y por este medio, el público en general de ambos valles.

Antecedentes

Actualmente, en diferentes países existen sistemas de alerta al público ante la perspectiva de diferentes calamidades que pueden afectar las actividades normales de la población, tales como peligro de guerra o

invasión, escape de isótopos radioactivos, escape de gases tóxicos, detección de huracanes y tornados, terremotos, etc. Como ejemplo, se puede citar el sistema de Alerta Sísmica para el tren Shinkansen (Tren Bala), en Japón, desarrollado por los Ferrocarriles Nacionales del Japón (JNR) a partir de los años sesenta. El propósito de ese sistema es reducir la velocidad de los convoyes y detenerlos si es necesario, cuando las estaciones detectoras reconocen que se está desarrollando un sismo importante. Inicialmente, las estaciones detectoras fueron instaladas a ▷

Este artículo fue elaborado por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES).

lo largo de la vía férrea para detener el tren en cuanto se detectaba un sismo. Posteriormente se agregaron al sistema las estaciones detectoras instaladas en las costas del Japón, con el fin de disponer de un tiempo de anticipación entre la detección del sismo y la detención del tren. El intervalo de anticipación se obtiene al tomar ventaja de la diferencia en las velocidades de propagación existente entre las ondas de radio y las ondas sísmicas.

Las ondas sísmicas se consideran compuestas de ondas longitudinales, que producen esfuerzos de compresión-tensión y de ondas transversales de mayor amplitud, que producen esfuerzos cortantes muy destructivos. Las ondas sísmicas longitudinales, conocidas también como ondas primarias o P, se propagan a una velocidad aproximada de 8 km/seg. Las ondas transversales, conocidas también como ondas secundarias o S, viajan más lentamente,

aproximadamente a 4 km/seg. Estas velocidades dependen necesariamente del tipo de suelo por el cual se propagan. Las ondas de radio, se propagan aproximadamente a 300,000 km/seg.

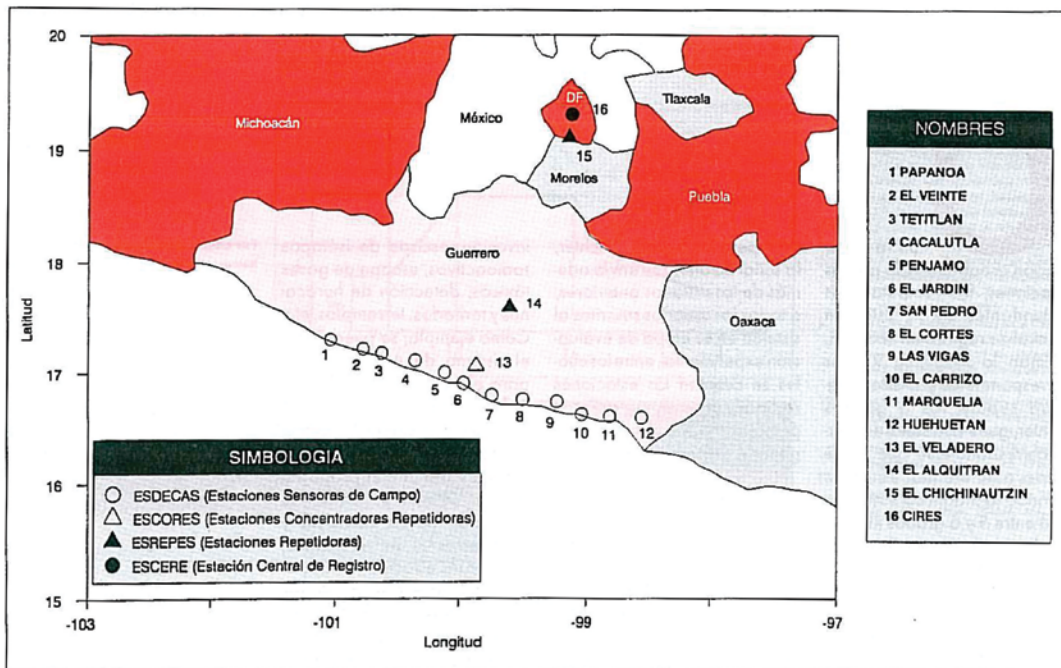
Para el caso de la Ciudad de México, el sistema detector de sismos se instaló en la costa del estado de Guerrero, porque se considera que potencialmente es muy alto el riesgo de que ocurra un sismo de magnitud mayor a 7 grados Richter, sobre todo en los llamados brechas o GAPs de Guerrero y de Ometepepec, debido al fenómeno de subducción entre las placas de Cocos y la placa Americana, a lo largo de la costa del Pacífico que afecta a los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Puesto que la Ciudad de México se encuentra aproximadamente a 320 km de distancia de la costa de Guerrero, las ondas P de un sismo originado en dicha costa

tardan 40 segundos en manifestar efectos en la Ciudad de México. Sin embargo, las ondas S, más destructivas tardan 80 segundos en arribar a la Ciudad de México. La fase destructiva de un sismo de gran magnitud, generalmente se percibe entre 30 y 60 segundos después del arribo de las ondas P a la ciudad.

El Sistema de Alerta Sísmica para la Ciudad de México

CIRES, con el patrocinio de las autoridades del Distrito Federal y con el apoyo de investigadores de diversas instituciones como el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra, desarrolló a partir de 1989 el Sistema de Alerta Sísmica para la Ciudad de México. Este sistema permite alertar con una anticipación promedio de 50 segundos a autoridades y a la población en general del valle de México sobre la

Ubicación de las estaciones del SAS.



ocurrencia inminente de un sismo que se esté desarrollando en la costa del estado de Guerrero y cuyos efectos serán percibidos aproximadamente un minuto más tarde.

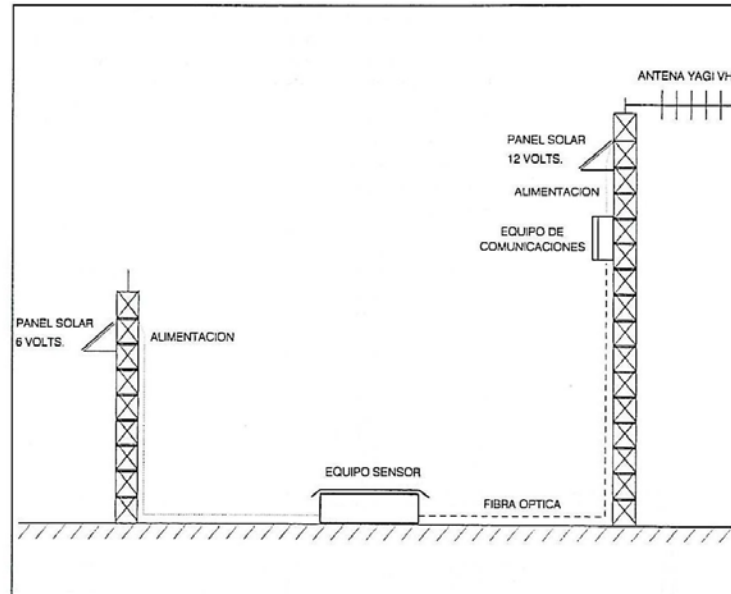
El SAS es un recurso tecnológico desarrollado para comunicar la ocurrencia de un fenómeno natural, de pronóstico difícil a la población de una región altamente vulnerable. El grado de eficacia del SAS dependerá no sólo de la confiabilidad del equipamiento, sino del grado en que el público usuario sepa reaccionar oportunamente a las señales de la alerta sísmica y ejecute oportunamente sus planes particulares de prevención.

El SAS es un sistema complejo que puede analizarse agrupándolo en los siguientes conceptos:

- ✓ Estaciones sensoras de campo
- ✓ Estaciones repetidoras
- ✓ Estación central de registro
- ✓ Sistema de difusión de alertas

Estaciones sensoras de campo

El sistema detector de sismos está integrado por doce estaciones sensoras de campo, instaladas con una separación aproximada de 25 km, por lo que se abarcan aproximadamente 275 km de costa entre las localidades de Papanaoa hasta Huehuetán. Cada estación sensora de campo puede reconocer un sismo si ocurre dentro del radio de captura que abarca desde 10 hasta 85 km. Las estaciones de campo operan 24 horas al día con energía solar y baterías recargables. En cada estación sensora una computadora personal tipo Laptop evalúa continuamente la información captada localmente por tres acelerómetros montados en un arreglo ortogonal. La información se digitaliza a razón de 100 muestras por segundo en cada canal. Un algoritmo ex-



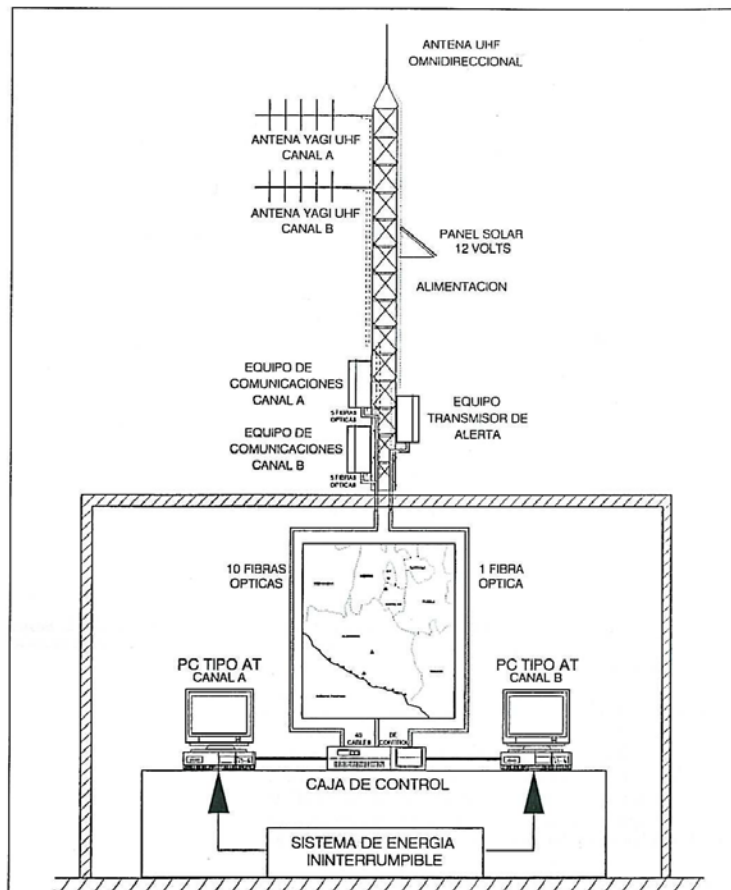
Configuración básica de la ESDECA.

perto para reconocimiento del patrón de los sismos de esta región determina cuando la estación de campo debe enviar un mensaje indicativo de la ocurrencia de un sismo real. El algoritmo actualmente empleado puede reconocer un sismo dentro del área de captura en menos de 10 segundos con una confiabilidad del 80%. Sin embargo, se continúan las investigaciones con otros algoritmos detectores de sismos para mejorar la confiabilidad y aumentar el rango de captura de las estaciones.

Cuando la estación de campo reconoce un sismo, activa un sistema de radiocomunicación a fin de enviar al Centro de Procesamiento en la Ciudad de México el mensaje correspondiente con los parámetros determinados por el algoritmo reconocedor de sismos. Los parámetros más importantes transmitidos son el nivel de energía E, alcanzado en el periodo de observación y la tasa de crecimiento de E entre muestras.

Estaciones repetidoras

Para conducir, vía radio, a la Ciudad de México los mensajes generados por las estaciones de campo durante el desarrollo de un sismo y los mensajes de supervisión diaria enviados a horas fijas por cada estación de campo, se instaló un sistema de radiocomunicación dual, también operado 24 horas al día con energía solar y baterías recargables, compuesto por 6 estaciones repetidoras que operan en la banda de frecuencias ultra altas (UHF). Cada estación repetidora tiene un receptor y un transmisor de radio. El receptor está continuamente operando. Cuando el receptor recibe el preámbulo de un mensaje de estación de campo, enciende el transmisor para retransmitirlo, con lo cual se activa el siguiente repetidor. Este proceso se repite en cada estación repetidora subsecuente hasta que ambos enlaces, desde la costa hasta la Ciudad de México se activan, lo cual toma hasta 2 segundos en to- ▶



Configuración básica de la ESCERE.

tal, transcurridos los cuales, la estación de campo envía el mensaje correspondiente al sismo detectado, el cual llega hasta la estación central de registro, localizada en las instalaciones del CIRES.

Estación central de registro

La estación central de registro, ESCERE, tiene una configuración 100% redundante. En la ESCERE, se reciben los mensajes enviados por las estaciones de campo, mediante el sistema dual de comunicaciones. Los

mensajes empleados más importantes son: mensajes de reporte programados cada 12 horas y mensajes espontáneos, enviados cuando se detecta un sismo.

En la ESCERE, los mensajes de reporte programado permiten supervisar continuamente el desempeño de las estaciones de campo y de los repetidores del sistema. Los mensajes espontáneos con parámetros de un sismo, se procesan para estimar la magnitud correspondiente mediante un sistema externo que ubica los parámetros

recibidos en el plano de una familia de curvas que relaciona la magnitud del sismo con la energía E , y la tasa de crecimiento dE/dt . Esta familia de curvas se obtuvo estudiando los acelerogramas obtenidos en casi 100 sismos reales registrados dentro de la región de interés. El sistema actualiza la familia de curvas con cada sismo que procesa, de manera que continuamente se mejora la exactitud de la evaluación obtenida.

De acuerdo al valor de la magnitud estimada al procesar la información recibida, se generan señales de alerta para los siguientes intervalos de magnitud Richter:

- $M < 5^{\circ}$ No se genera señal alerta. Solo se registra como evento de baja magnitud.
- $5^{\circ} = M < 6^{\circ}$ Se genera señal de alerta para usuarios expertos y se activan registradores sísmicos.
- $6^{\circ} < M$ Se genera la señal de alerta sísmica general.

Sistema de difusión de alertas

Las señales de alerta generadas por el CIRES en caso de sismo se difunden con tres métodos de comunicación vía radio:

- ✓ enlace directo CIRES-usuario
- ✓ enlace mediante radiodifusora
- ✓ enlace por telecontrol digital

El enlace directo se emplea con aquellos usuarios que por el número de personas que emplean o que acuden a sus instalaciones (METRO, CFE, IMSS, SEP, etc.) tienen la capacidad y el interés de colaborar en el financiamiento de los gastos originados por la operación, conservación y mejoras del sistema.

Se emplea enlace mediante radiodifusoras a fin de am-

pliar lo más posible el alcance público de la señal de alerta sin incurrir en costos, puesto que el público no necesita invertir en equipo alguno.

Se emplea enlace por telecontrol digital en aquellos sistemas críticos que pueden controlarse remotamente y con aquellos usuarios que pueden cubrir los costos del equipamiento requerido. En este método de difusión de la señal de alerta se aprovecha la infraestructura existente en la Ciudad de México con dos o tres estaciones radiodifusoras de frecuencia modulada (FM), a la que se le agrega una señal digital, inaudible pero de muy alta confiabilidad, capaz de telecontrolar varios tipos de receptores especializados. La tecnología empleada, ha estado en uso en Europa desde hace cerca de 10 años y se conoce en el medio de la radiodifusión como Radio Data System, RDS (en América se conoce como Radio Broadcast Data System, RBDS).

Actualmente, el CIRES está evaluando este último sistema, que tiene la capacidad de activar selectivamente receptores de audio del tipo "inteligente" de bajo costo, telecontrolados y reproducir mensajes en el nivel sonoro adecuado, aun cuando la mayor parte del tiempo están silenciosos. El receptor además puede activar, por control remoto, contactos con los cuales se pueden controlar otros sistemas de protección asociados. Existen tipos de receptores especiales capaces de reproducir textos luminosos, controlar sirenas de alta potencia, también con activación selectiva.

Mediante el sistema de activación selectiva, se pueden conducir diferentes señales de alerta, individuales, por zonas, por regiones o generalizadas para toda la población, de acuerdo al tipo de riesgo y la cantidad de personas potencialmente amenazadas. Un ejemplo de aplicación lo constituye

la alerta para el riesgo del volcán Popocatepetl, actualmente en evaluación. Con el mismo sistema de alerta para el riesgo volcánico, se podría alertar paulatinamente en primer lugar las zonas de mayor riesgo y posteriormente las de menor riesgo, sin alertar innecesariamente a la población de la Ciudad de México, relativamente más segura ante una erupción. Alternativamente, no sería necesario alertar a la población cercana al volcán cuando se trate de difundir una señal de alerta sísmica en la Ciudad de México.

Resultados obtenidos con el SAS

El Sistema de Alerta Sísmica para la Ciudad de México (SAS), entró en operación el 1 de agosto de 1991. Desde entonces se han detectado sismos de diferentes magnitudes ocurridos en 220 fechas. El número de registros obtenidos supera los 360, ya que un mismo sismo puede ser detectado por más de una estación.

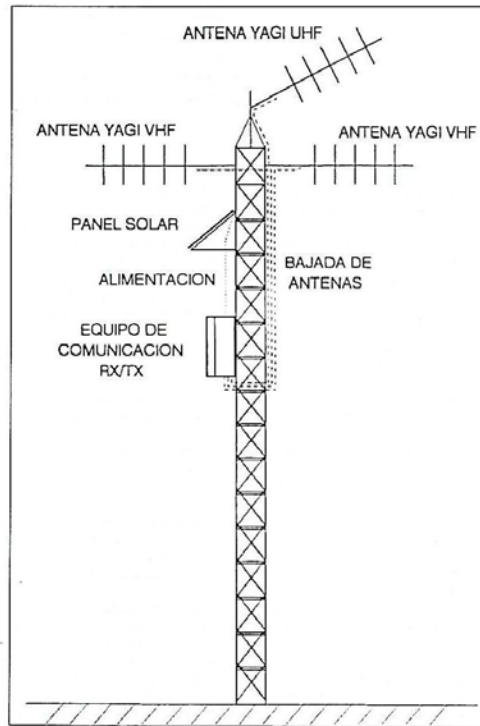
De los 220 sismos detectados, 194 han sido clasificados correctamente por la Estación Central de Registro como sismos de magnitud baja indeterminada; 13 como sismos de magnitud menor de 5 grados Richter; 8 con magnitud entre 5 y 6 grados Richter y 5 como sismos de magnitud mayor de 6 grados Richter.

El SAS, fue hecho del conocimiento público el día 1 de junio de 1993 y la difusión de la señal de alerta para el público en general mediante estaciones radiodifusoras en el Distrito Federal y valle de Toluca se puso en operación a partir del 1 de agosto de 1993.

El día 24 de octubre de 1993, a las 01:52 hora local, ocurrió un sismo de magnitud 6.7 en las coordenadas 16.5 N y 99.00 W, que corresponde a la costa Guerrero-Oaxaca el cual fue sentido en el D.F., con intensidad de 7 grados y

en Puebla con intensidad de 5 grados de la escala de Mercalli modificada (fuente: Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM). Este evento, el más intenso registrado desde que se instaló el SAS, fue detectado oportunamente por 9 de las 12 estaciones detectoras del SAS instaladas en la costa de Guerrero, las cuales transmitieron los mensajes correspondientes hasta la Estación Central de Registro, en la Ciudad de México. De los mensajes transmitidos por las estaciones 7, 10 y 11 se evaluó la magnitud correspondiente a sismo de magnitud mayor de 6 grados Richter. De la estación 8 se obtuvo una evaluación de magnitud menor de 6 grados Richter y de las demás estaciones se evaluó como evento de magnitud menor de 5, debido ▶

Configuración básica de la ESCORE.



a su mayor distancia al epicentro. Al intentar difundir la señal de alerta para sismo mayor de 6 grados Richter con el sistema de difusión de alertas puesto en operación el 1 de agosto de 1993, el sistema generó un mensaje que no indicó estado de alerta, sino rutina de supervisión. La causa del error se encontró en la sección del programa recién modificada para manejar este nuevo sistema de difusión de alertas al público. El error fue corregido dentro de las 8 horas posteriores a la ocurrencia de la falla.

El día 16 de noviembre de 1993, a las 19:20 hora local, después de haberse corregido la falla anterior, se generó la señal de alerta pública que se difundió en la Ciudad de México por varias radiodifusoras y generó un estado de tensión entre la población del Distrito Federal, sin llegar a causar ningún hecho lamentable por situaciones de pánico o terror incontrolado. Sin embargo, no existió el sismo que dicha señal

anticipó. La causa se debió a que una estación de campo generó, aisladamente, un mensaje de sismo cuyos parámetros indicaron que correspondían a un sismo de magnitud mayor de 6 grados. Una falla, en un componente del sistema de regulación de energía proveniente del panel solar, evitó la recarga de la batería de alimentación, por lo cual se fue agotando paulatinamente y en cierto nivel produjo inestabilidad en los acelerómetros, los cuales generaron un patrón de ruido análogo al de un sismo real. El sistema en su diseño original considera esta posibilidad de falla, no obstante los mecanismos de seguridad incluidos ante fallas de los componentes electrónicos, por lo que requiere que exista confirmación de mensajes, dos más de una estación detectora antes de generar la señal de alerta general. En esta ocasión, el mecanismo de confirmación se había desconectado en atención a las sugerencias de diversas perso-

nalidades que consideraron que era más valioso ganar tiempo (10 a 15 segundos adicionales) en favor de la anticipación de la señal de alerta, que "perderlo" en espera de una confirmación para no exponerse a una señal de alerta falsa. Actualmente, debido a la mala imagen que del sistema se produjo, se reconectó el mecanismo de confirmación de los mensajes.

Para permitir la revisión exhaustiva del Sistema de Alerta Sísmica para la Ciudad de México, las autoridades de la ciudad determinaron la suspensión de la difusión de la señales de alerta al público. Sin embargo, el sistema de alerta no dejó de operar en los enlaces directos para la difusión de la señal de alerta. Entre los principales cambios realizados al sistema durante el año de suspensión se puede enumerar: el cambio de frecuencias de comunicación para los repetidores del sistema; el cambio del equipo de radio empleado en los repetidores por otro de mayor calidad (y costo); la elaboración y seguimiento de procedimientos periódicos de verificación integral del sistema detector del sistema de difusión de alertas; la instalación de plantas de emergencia en las instalaciones del CIRES; la instalación experimental del sistema de difusión de alertas RDS/RBDS; la certificación y auditoría técnica del sistema y de los procedimientos de mantenimiento empleados, así como la implantación de los cambios que se consideraron necesarios en ellos.

Se está revisando el equipamiento automático de las estaciones radiodifusoras a fin de determinar su confiabilidad para acoplarse a la señal de control de la emisión de la señal de alerta por cada una de las estaciones radiodifusoras, que en la actualidad se realiza manualmente por medio del operador en turno. □

i VANCE Dale L. and WHITCOMB Jean P., AN EARTHQUAKE ALARM SYSTEM, *Earthquake Notes, National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA), Environmental Research Laboratories, (ERL), Earth Sciences Laboratories, Washington, D.C. JRNL CODE ENOTE1*, pp. 9-12, 1972.

ii HEATON Thomas H. A MODEL FOR SEISMIC COMPUTERIZED ALERT NETWORK, *Science*, vol. 228, 24 may, 1985, pp. 987-990.

iii SIEBERT H. P. AUTOMATIC RADIO EARLY WARNING TESTED SUCCESSFULLY IN JAPAN IN CASES OF EARTHQUAKE. *Revista FUNKSCHAU*, Num. 2, pp. 65-66, 1983

iv TYLER R. G. and BECK J. L. AN EARTHQUAKE ALARM SYSTEM FOR THE MAUIA OFFSHORE PLATFORM, NEW ZEALAND. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 1 pp. 297-305, February 1983.

v MICHEL Andrew J., GILDEA Stephen P., PULLI Jay J., A REAL-TIME DIGITAL SEISMIC EVENT DETECTION AND RECORDING SYSTEM FOR NETWORK APPLICATIONS. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72, No. 6, pp. 2339-2348, December 1982.

vi STEWART Samuel W. REAL-TIME

DETECTION AND LOCATION OF LOCAL SEISMIC EVENTS IN CENTRAL CALIFORNIA. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 67, No. 2, pp. 433-452, April 1977.

vii GIEDHILL K. R. AN EARTHQUAKE DETECTOR EMPLOYING FREQUENCY DOMAIN TECHNIQUES. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 6, pp. 1827-1835, December 1985.

viii HOULISTON D. J., WAUGH G., LAUGHLIN J., AUTOMATIC REAL-TIME EVENT DETECTION FOR SEISMIC NETWORKS. *Computers & Geosciences* Vol. 10, No. 4, pp. 431-436, 1984 [British Geological Survey, Murchison House, West Mains Road, Edinburgh EH 9 3LA, Scotland].

ix BITO Yashuhisa y NAKAMURA Yutaka, URGENT EARTHQUAKE DETECTION AND ALARM SYSTEM, UEDAS. *Civil Engineering in Japan/86*. Japan Society of Civil Engineers, pp. 103-116.

x NAKAMURA Yutaka, EARTHQUAKE ALARM SYSTEM OF THE JAPANESE NATIONAL RAILWAYS. *Journal of Railway Engineering Research*, Vol. 42, Num. 10, pp. 371-376, 1985.

xi MITO Yashihisa, NAKAMURA Yutaka, TOMITA Kenji, Ferrocarriles Nacionales

del Japón, Instituto de Investigaciones Tecnológicas Ferroviarias: PONENCIA SOBRE EL UEDAS, NUEVO SISTEMA DE ALARMA SISMICA DE LA NUEVA LINEA DEL TREN BALA, XVIII Congreso de Ingeniería Sísmica, Fecha: 24/07/1985-26/07/1985. Lugar: Auditorio de Ingeniería Civil, Colegio de Ingeniería Civil, Comité de Ingeniería Antisísmica. Asociación de Ingeniería Civil, Yatsuya 1-0, Shinjuku, Tokio. Tel: 03-355-3441 (conm.).

xii NAKAMURA Yutaka, SAITO Akio, Ferrocarriles Nacionales, Instituto de Tecnología Ferroviaria: VI SIMPOSIO SOBRE INGENIERIA SISMICA DE JAPON, 1982. Fecha: 1982, Diciembre 1-3. Auspiciado por Architectural Institute of Japan, Japan Society of Mechanical Engineers, The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Seismological Society of Japan. Ponencia: DESARROLLO DEL SISTEMA DE PRONTA DETECCION Y ALARMA DEL SISMO.

xiii FUJIWARA Toshiro, NAKAMURA Yutaka NEW AUTOMATIC STOPPING SYSTEM DURING EARTHQUAKE (II), *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, September 8-13, 1980, Istanbul, Turkey.