



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO DE IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA
DE MONITOREO TERMICO PARA EL
VOLCAN POPOCATEPETL**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

AREA ELECTRICA - ELECTRONICA

P R E S E N T A N :

LORENZO OROZCO VALDES

SANTIAGO FERNANDEZ SUAREZ

**DIRECTOR DE TESIS: DR. SERVANDO DE LA CRUZ REYNA
CO-DIRECTOR DE TESIS: ING. ROBERTO MANDUJANO WILD**

CIUDAD UNIVERSITARIA

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2906/20



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis Padres,

A la U.N.A.M.,

A Lorenzo y su familia por su gran paciencia,

Y a todos mis amigos que me acompañaron durante el camino.

Santiago

A ÉL y a María

A Martha, que en breve seremos compañeros de vida

A mis Papás y hermanos

A mi Ata y a la memoria de mi Ato y abuelitos

A mis Papás y hermanas García García

A mis amigos y maestros

A toda la comunidad de La Asunción

Al ejemplo de C. Sander

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A todos los amantes de la naturaleza: NAIRDA, Agustín, ...

A toda mi Nación Mexicana

Lorenzo

Prólogo

Queremos empezar esta tesis explicando las razones que nos impulsaron a elegir este proyecto como tema.

Debido a la admiración y el respeto profundo que sentimos por la naturaleza y sus fenómenos, deseábamos, en la medida que nuestra carrera lo permitiera, acercarnos a ellos. El riesgo de la eventual erupción del volcán Popocatépetl era sin duda un tema que nos ofrecía un proyecto gracias al cual podríamos acercarnos a la naturaleza aplicando lo mejor posible nuestros conocimientos de ingeniería. Sobre todo, buscamos hacer un proyecto que prestara en alguna forma servicio a la comunidad y que se pudiera concretizar, sin quedar sólo escrito en un libro. Decidimos investigar en el Centro Nacional de Prevención de Desastres los proyectos que se realizaban para monitorear al volcán. Tuvimos la suerte de conocer al encargado de investigación del centro, el Dr. Servando de la Cruz, quien nos ofreció enseñarnos a emplear una cámara térmica recién donada por JICA. Una vez familiarizados con el dispositivo, pensamos en la posibilidad de elaborar un proyecto para monitorear las temperaturas del volcán, que se concretizó en el tema de nuestra tesis, "Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo Térmico para el Volcán Popocatépetl".

Sin duda, aprendimos muchas cosas, de varias disciplinas; aprendimos a convivir con mucha gente y vivimos muchas experiencias que, sin duda, fueron una época muy valiosa de nuestras vidas.

Lorenzo y Santiago.

Enero, 1998

Agradecimientos

Dentro de la realización de este trabajo de tesis fue indispensable la *colaboración de varias entidades*

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), gracias al cual se desarrolló este proyecto, en conjunto con el Instituto de Geofísica. Agradecemos al Dr. Meli por dar luz verde a este nuevo sistema de monitoreo; a todas las distintas áreas: investigación, monitoreo volcánico, instrumentación sísmica y administración, por su gran ayuda.

Instituto de Geofísica de la UNAM, por su apoyo en todas las fases de este proyecto.

TELEVISIÓN y su personal, por su ayuda y apoyo en sus instalaciones del cerro Alzomoni, en donde se localiza actualmente la caseta de monitoreo de Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

TELMEX, al Ing. Darío Fernández de Lizardi y al Ing. Miguel Angel Pech, y a toda la compañía, por su entusiasta apoyo. Teléfonos de México hizo posible la compra e instalación de un enlace entre el cerro de Alzomoni y el CENAPRED.

Cibernética y Electrónica, a todo su personal por su paciencia y su valioso tiempo.

Procuraduría General de la República (PGR), por su préstamo de helicóptero para sobrevolar al volcán.

Dirección de Protección Civil del municipio de Amecameca por sus diversos servicios que prestaron durante el acondicionamiento de la caseta.

Agradecimientos

Agradecemos a todas y cada una de las personas que colaboraron en el diseño e implementación de este sistema que, por razones de espacio, no son mencionadas.

Ing. Roberto Mandujano Wild, profesor y amigo, que enfocó el proyecto en nuestra rama de ingeniería, y ayudó a conseguir distintos contactos, vitales para la realización de este sistema.

Dr. Servando de la Cruz Reyna, director de tesis y amigo, quien nos introdujo al fascinante tema del monitoreo volcánico

Ing. Roberto Quaas Weppen, por toda su dirección, apoyo y tiempo dedicado a la realización de este proyecto.

Ing. Javier Jiménez Espriú, quien nos ayudó a obtener la tarjeta de adquisición y control (DIF Board).

Arq Juan Pablo Fernández, por su colaboración en la adaptación de la nueva caseta.

A Don Gregorio

Y a tanta gente que nos brindó ayuda con su apoyo, sus conocimientos y su paciencia; en particular a Lidia, Gloria y Margarita

A todos, muchas gracias.

ÍNDICE

1	Introducción	
1.1	El Popocatépetl	1
1.1.1	Historia	1
1.1.2	Actividad actual	2
1.2	Monitoreo en el volcán Popocatépetl	3
1.2.1	El motivo del monitoreo	3
1.2.2	Red instrumental de monitoreo y vigilancia en el volcán Popocatépetl	4
1.2.3	Tipos de monitoreo	6
1.2.4	Procesamiento y evaluación de la información	9
1.3	Monitoreo térmico existente en el mundo	10
1.3.1	Diferentes tipos de monitoreo térmico	10
1.4	Necesidad de un monitoreo térmico en el volcán Popocatépetl	13
2	Equipo térmico disponible	
2.1	Descripción y funcionamiento del equipo	15
2.1.1	Cámara detectora infrarroja (Thermo Tracer TH3104MR)	15
2.1.2	Principio de funcionamiento de los sensores infrarrojos	16
2.1.3	Estructura interna y funciones del equipo térmico	24
2.2	Resultados Preliminares	26
2.2.1	Por tierra	26
2.2.2	Por aire	28
2.2.3	Conclusiones de los resultados preliminares	28
3	Diseño e implementación del monitoreo térmico	
3.1	Requerimientos para establecer el monitoreo térmico	32
3.2	Localización de la cámara térmica	32
3.3	Esquema del monitoreo	34
3.4	Implementación del sistema de monitoreo térmico	37
3.4.1	Acondicionamiento de la estación remota	37
3.4.2	Adquisición de la imagen	42
3.4.3	Control de la estación remota	43
3.4.4	Enlace	51
3.4.5	Configuración final	59
4	Conclusiones	61
5	Bibliografía	65
	Apéndice A Descripción y funcionamiento de la unidad de control TH31-366	68
	Apéndice B Guía de referencia rápida del programa de captura TH31-702	73
	Apéndice C Planta Arquitectónica de la nueva caseta en Altzomoni	76
	Apéndice D Comandos básicos del LaunchPad v 2.7	78
	Índice de Fotos, Figuras y Tablas	84

1 Introducción

1.1 El volcán Popocatepetl

1.1.1 Historia

El volcán Popocatepetl, cuyo nombre significa en Náhuatl "Cerro que humea", es uno de los 14 volcanes que han desarrollado actividad histórica, de cerca de 3000 conos volcánicos que existen en México. Su estructura separa grandes desarrollos urbanos: la ciudad de Puebla a 44 km al Este, la Ciudad de México situada a 70 km al Noroeste y las ciudades de Cuernavaca y Cuautla al Oeste, a 63 y 40 km respectivamente. Estas poblaciones involucran a más de 23 millones de habitantes.

Se trata de un estratovolcán andesítico-dacítico, localizado en las coordenadas 19.02°N y 98.62°W, tiene una altitud en su labio superior de 5426 msnm y en su labio inferior de 5243 msnm. Su cráter tiene forma elipsoidal con un semieje mayor de 820 m y uno menor de 620 m. El fondo del cráter se encuentra a 281 m por debajo del labio inferior. El glaciar del volcán tiene una superficie aproximada de medio kilómetro cuadrado, con un grosor que se estima en un promedio de 30 a 50 m de hielo. Su edificio cubre un área de 500 km² abarcando parte de los estados de Puebla, México y Morelos.

El Popocatepetl es el segundo volcán más alto de nuestro país y pertenece al "Eje Volcánico Mexicano". Se sabe de crónicas y representaciones en códices, que éste volcán ha sido observado y venerado desde que existen registros. Destacan las representaciones que aparecen en el código Telleriano Remensis y del doctor Atl, así como las relaciones en las crónicas de Bernal Díaz del Castillo y Hernán Cortés, en las obras de Orozco y Berra, etc. En todo lo mencionado el Popocatepetl está representado o descrito en una etapa de actividad.

En México se han tenido erupciones volcánicas recientes. Entre ellas, se encuentra el Parícutin en Michoacán, 1943; el Chichón en Chiapas, 1982; el Tacaná en Chiapas, 1986; el Volcán de Colima en Jalisco - Colima, con varios episodios de actividad en este siglo.

En la Foto 1.1 se presenta una imagen del volcán Popocatepetl durante una exhalación el 30 de junio de 1997.

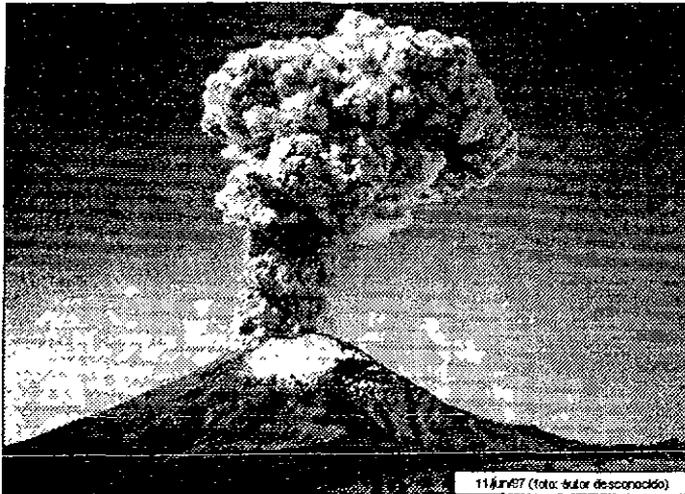


Foto 1.1. Volcán Popocatépetl.

1.1.2 Actividad actual

A fines de 1993, la fumarola que estaba emitiendo el volcán Popocatépetl llegó a ser lo suficientemente importante para que el Sistema Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación creara un Comité Científico Técnico Asesor. Este comité tendría la función de evaluar el riesgo volcánico, coordinar y dirigir las acciones de monitoreo y de instrumentación científica del volcán. De esta forma, los organismos estatales y federales de protección civil, tendrían un canal de información fidedigna y colegiada sobre la situación del volcán. A partir del fin de 1994, el volcán pasó de una fase meramente fumarólica de actividad a una mayor actividad sísmica y de emisión de gases y cenizas. Posteriormente, a partir de marzo de 1996, se detectó extrusión de lava.

En los estados de Puebla, Morelos y México viven 1'300,000 habitantes en diferentes comunidades cercanas al volcán. En la zona de alto riesgo se contemplan a 100,000 personas, en zona de mediano riesgo a 300,000 y de menor riesgo a 900,000. Aunque no toda esa población está situada en áreas de alto riesgo, el impacto económico y social que originaría una erupción mayor del Popocatépetl sería de gran importancia para el país.

1.2 Monitoreo en el volcán Popocatépetl

1.2.1 El motivo del monitoreo

Para poder saber qué es lo que ocurre en el volcán y evaluar el estado de actividad y riesgo que éste presenta, se requiere observarlo y vigilarlo en forma sistemática. Para ello se emplean diversos métodos visuales e instrumentales. En la mayoría de los casos, es posible descubrir cambios cualitativos y cuantitativos de su estado, con la finalidad de detectar oportunamente alguna variación importante de su actividad y, de ser posible, anticipar alguna condición anómala precursora de un proceso eruptivo. Con esta información, se pueden tomar medidas de prevención o en su caso, poner en marcha un plan de emergencia previamente establecido por los organismos correspondientes.

La implementación de un monitoreo en el volcán Popocatépetl empezó formalmente en 1993, cuando el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. instaló la primer estación sísmica *telemétrica permanente en el volcán*. Posteriormente, la *Secretaría de Gobernación junto con la Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Ingeniería e Instituto de Geofísica)* apoyó al Centro Nacional de Prevención de Desastres para que empezara la vigilancia del volcán.

La vigilancia de un volcán consiste en la observación continua y permanente del mismo, por medio de una instrumentación especializada. La vigilancia volcánica incluye los siguientes pasos¹:

- De acuerdo con las características del volcán, establecer y diseñar sistemas instrumentales y métodos de observación.
- Definir bases de referencia cuando el volcán se encuentre en mínima actividad.
- Monitorear su actividad de manera continua y sistemática; llevar un registro de observaciones.
- Reconocer cambios observados en su estado que pudieran ser precursores de la actividad eruptiva.
- Instrumentar e implantar un plan de emergencia enfocado a prevenir algún desastre.

¹ Comité Científico Asesor Cenapred-UNAM, VOLCAN POPOCATÉPETL ESTUDIOS REALIZADOS DURANTE LA CRISIS DE 1994-1995, p. 26

1. Introducción

Clave	Nombre	Localización	ALT. (m)	LAT. N	LONG. W	Instrumentación
PCR	CENAPRED	CENAPRED, México D.F.	2365	19.3151	99.1747	Puesto central de recepción, registro, monitoreo y procesamiento de información de toda la red.
PRAD	CENAPRED	CENAPRED, México D.F.	2365	19.3151	99.1747	Radar Doppler hidrometeorológico
PCA	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.3151	98.6535	Cámara de video
IIA	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	Sismómetro vertical (1 Hz)
PPA	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	Sismómetro triaxial banda ancha *
PPM	TLAMACAS	Microondas Tlamacas	3980	19.1204	98.6278	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPC	COLIBRI	Ladera SW cerca de San Pedro Benito Juárez	2650	19.0663	98.5572	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPB	BONSAI	Ladera NE cerca de Santiago Xalitzintla	3080	18.9870	98.5600	Sismómetro triaxial (1 Hz)**
PPX	CHIPIQUIXTLE	Arenales ladera SW	3980	19.0498	98.6566	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PIX	CHIPIQUIXTLE	Arenales ladera SW	3980	19.0088	98.6566	Inclinómetro biaxial
PPT	TETEXCALOC	Ladera sur	3300	19.0088	98.6241	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPP	CANARIO	Refugio El Canario	4170	18.9745	98.6280	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PIP	CANARIO	Refugio El Canario	4170	19.0412	98.6280	Inclinómetro biaxial
PiN	NEXPAYANTLA	Loma el SW de Tlamacas	4100	19.0412	98.6355	Inclinómetro biaxial
PPN	LOMO DEL NEGRO	Yoloxóchitl, ladera NW	3700	19.0465	98.6738	Sismómetro vertical (1 Hz)
IIB	CALO	Cerro Calo, Chalchihuaapan	2500	19.0744	98.3448	Sismómetro vertical (1 Hz)
PPO	CALO	Cerro Calo, Chalchihuaapan	2500	18.9641	98.3448	Sismómetro triaxial banda ancha *
PPY	AYAQUEME	Cerro Ayaqueme, cerca de Juchitepec	2800	18.9641	98.9941	Sismómetro vertical (1 Hz)
PPS	TECHALOTEPE C	SW de San Nicolás de los Ranchos	2700	19.1465	98.5000	Sismómetro vertical (1 Hz)
PPQ	LOS CUERVOS	Parte alta ladera sur	4200	19.0030	98.6248	Sismómetro vertical (1 Hz)
PIQ	LOS CUERVOS	Parte alta ladera sur	4200	19.0009	98.6248	Inclinómetro biaxial
PPE	ECATZINGO	Ladera SW				Sismómetro banda ancha triaxial **
IIG	IGUALA	Cerro Tuxpan, Iguala, Gro.	1750	18.3760	99.4680	Sismómetro vertical (1 Hz)
IIS	CD. SERDAN	Cerro Zompantepec, Puebla	2985	18.9910	97.3740	Sismómetro vertical (1 Hz)
PFM1	CANARIO	Refugio de El Canario, barranca Tenenepanco, ladera norte	4170	19.0412	98.6280	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM2	ESPINERA	Barranca Espinera, ladera norte	4294	19.0383	98.6255	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM3	UNION	Unión de las barrancas Espinera y Tenenepanco	3693	19.0681	98.6122	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM4	TLAMACAS	Microondas cerro Tlamacas	3980	19.0663	98.6278	Repetidor de estaciones detectoras de flujo, pluviómetro

* Instalación prevista

** Temporalmente fuera de operación

Tabla 1.1. Localización e instrumentación de las estaciones de la red de monitoreo del volcán Popocatepetl.

monitoreo se necesita observar al volcán, ya sea en forma directa, en visitas de campo o con vuelos en helicóptero, con ayuda de cámaras de video y cámaras fotográficas.

El monitoreo de tipo visual cuenta actualmente y en forma permanente, con una cámara de video localizada en el cerro Altzomoni, en las faldas del Iztaccíhuatl, que transmite su señal hacia el CENAPRED vía microondas. Gracias a este tipo de monitoreo se puede tener registro en cinta de algunas de las más importantes emanaciones de ceniza (diurnas) y permite calcular su altura, velocidad y orientación. El monitoreo visual es efectivo siempre y cuando sea de día y esté despejado.

1.2.3.2 Monitoreo por radar

Se ha instalado en forma experimental en el CENAPRED, conjuntamente con el U.S. Geological Survey, un radar de tipo doppler, meteorológico. Este radar es empleado para conocer la dirección y cantidad de ceniza de una fumarola cuando ésta contiene *concentraciones de ceniza y materiales sólidos que son expulsados del cráter durante una erupción.*

Este instrumento ha sido de gran ayuda especialmente en los días que se han tenido grandes exhalaciones de ceniza. El radar permite ubicar la exhalación, pudiendo informar a las autoridades con mayor precisión de su localización. Además, es particularmente útil cuando se presenta este tipo de fumarolas en días en los que el clima no permite tener la imagen visual del volcán.

1.2.3.3 Monitoreo sísmico

Tiene por objeto *localizar las fuentes de sismicidad e inferir la estructura interior del volcán* así como los cambios en la misma. Los microsismos son detectados por una red de sismógrafos localizados alrededor del volcán. Existe una gran variedad de estos instrumentos dependiendo de la tecnología que emplean. En ocasiones, se emplean sismógrafos portátiles de papel ahumado o también sismógrafos digitales. Para monitoreo en tiempo real, se utiliza la transmisión de la señal sísmica, utilizando técnicas de telemetría vía radio digital. Los transductores usados son sismómetros de periodo corto, de tres componentes. También hay otros con respuesta en frecuencia a señales de periodo largo o de banda ancha, próximos a instalar. Estos instrumentos amplían la banda de frecuencia a 50 Hz y tienen una resolución de 24 bits.

Las estaciones sismológicas, con instalaciones permanentes de resguardo, tienen tres elementos: sensor, acondicionador de señal y transmisor. Las estaciones son autónomas, alimentadas a base de celdas solares y transmiten ya sea en UHF o en VHF, de manera digital y/o analógica.

Con los registros de estas señales, se pueden localizar los hipocentros de los sismos tectónicos. Estos puntos están ubicados entre los 8 y 13 km de profundidad por debajo de la cima. Los sismómetros permiten registrar e identificar otras vibraciones sísmicas como son los temores armónicos y otras señales peculiares que se presentan durante la erupción y movimiento del magma.

Las señales originadas por sismos regionales también son captadas. Para discriminar la actividad propia del volcán a los sismos regionales, se reciben en CENAPRED señales sísmicas de Ciudad Serdán, Pue., e Iguala, Gro (Operadas por el Instituto de Ingeniería-UNAM). La alarma del volcán es inhibida con la presencia de este tipo de sismos.

1.2.3.4 Monitoreo geodésico

El monitoreo geodésico consiste en observar continuamente las deformaciones que sufre el edificio volcánico a consecuencia de los esfuerzos originados en el interior del volcán. Estas mediciones se realizan con diferentes instrumentos y se requiere la instalación de redes de estaciones monumentadas, puntos de observación e inclinómetros de diversos tipos. Las mediciones son obtenidas por métodos geodésicos convencionales (nivelación, triangulación, trilateración, etc.), por gravimetría, y mediante sistemas de posicionamiento global GPS.

Este tipo de monitoreo se realiza con 3 modalidades diferentes que se aplican en el volcán: geodesia por satélite (basado en sistema de posicionamiento global GPS), medición electrónica de distancia (EDM) teniendo una resolución de 1 a 3 ppm a una distancia promedio de 3 km y por medio de inclinometría. En un futuro se utilizará interferometría de radar como una cuarta modalidad.

Actualmente se tienen 4 estaciones inclinométricas, mismas que utilizan un sensor biaxial de alta ganancia y uno monoaxial de baja ganancia.

1.2.3.5 Monitoreo geoquímico

Consiste en observar la composición química mediante un análisis de gases de fumarolas, manantiales, cenizas, lavas y otros productos generados por el volcán como resultado de su actividad. En este monitoreo también se registran los vientos, temperatura, precipitación, el nivel de pH de los manantiales cercanos al volcán, la calidad y tipo de ceniza y emanación de gas radón. Para medir la concentración del gas SO_2 y CO_2 se utilizan equipos de espectrometría, como lo son el COSPEC y LiCor, respectivamente. Estas mediciones se realizan tanto por tierra como por aire, de una a dos veces por semana.

1. Introducción

1.2.4 Procesamiento y evaluación de la información ⁶

Las más de 60 señales transmitidas por telemetría en forma continua, las 24 horas del día, son recibidas en un puesto central de registro y procesamiento localizado en CENAPRED. Al detectarse *cualquier incremento anormal* de la actividad sísmica del volcán, se activa un sistema de alarma acústica y, a través de un sistema de marcado automático, se envían mensajes a teléfonos particulares, celulares y localizadores del personal de guardia.

Las señales sísmicas se despliegan y grafican en papel en tiempo real. Una vez adquirida y procesada la información, es concentrada y almacenada en un banco de datos para ser posteriormente analizada por personal científico. En la Figura 1.3, se presenta el diagrama general en bloques del puesto central de registro; en la Foto 1.2, las instalaciones y procesamiento de información del volcán; en la Foto 1.3, la fachada exterior de CENAPRED

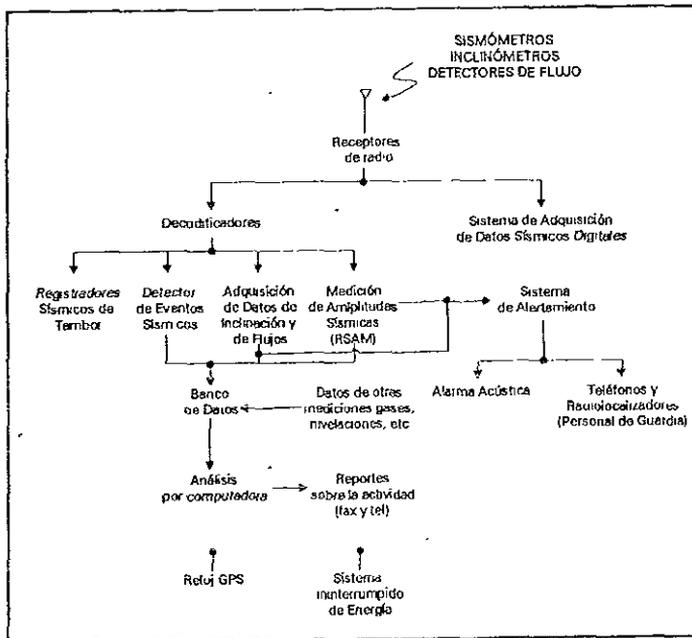


Figura 1.3 Diagrama general en bloques del puesto central de registro

Un resumen de la actividad del volcán es reportada y diseminada cada semana entre la comunidad científica. En forma rutinaria son informadas las autoridades de la Secretaría de Gobernación y Protección Civil así como otros organismos. Para el público en general, se cuenta con un buzón telefónico, 205-1036 y por internet en <http://www.cenapred.unam.mx>.

⁶ Quaaas R., Op Cr. p., 16-20



Foto 1.2 Instalaciones y procesamiento de información del volcán en CENAPRED

En un futuro próximo se espera que un autómata proporcione información del estado del volcán vía remota a miembros del comité asesor.

1.3 Monitoreo térmico existente en el mundo

El objetivo del monitoreo térmico es medir de una manera periódica la temperatura de superficies (sólidas y/o líquidas) y de gases en los volcanes. Estas superficies pueden ser: lava (en el domo o en flujos), glaciares, laderas o cañadas, etc., o bien las fumarolas (compuestas principalmente por vapor de agua y SO_2) y exhalaciones (compuestas principalmente por ceniza).

1.3.1 Diferentes tipos de monitoreo térmico

Existen diferentes instrumentos de medición que permiten realizar diferentes tipos de monitoreo térmico. Se describirán a continuación diferentes métodos que se emplean para monitorear las temperaturas de los volcanes alrededor del mundo.

1.3.1.1 Por sensor local

Como su nombre lo indica, los sensores locales se caracterizan por encontrarse en contacto con el objeto del cual miden su temperatura. Los sensores locales de temperatura utilizados para monitoreo térmico son los termopares, que miden la temperatura de la superficie o gas en un solo punto, por lo que la situación térmica que existe a su alrededor no es captada. Se generan una serie de datos de temperaturas que quizás no correspondan a las más características del evento. Si se presenta otro suceso en un lugar distinto, habría que cambiar o instalar un nuevo sensor en dicho sitio, lo cual no es fácil realizar por la misma actividad del

volcán. Estos sensores se colocan en diferentes puntos de los que se quiere conocer la situación térmica, como son:

- Medición de la temperatura de lagos dentro del cráter antes de hacer erupción. Por ejemplo,
 - En el volcán Kelut en Indonesia (1990), los datos de temperatura eran enviados al satélite ARGOS para ser analizados en el centro de monitoreo.⁷
- Medición de la temperatura de fumarolas. Por ejemplo:
 - En el cráter del volcán de Colima en México (1991-1993), se monitorearon continuamente las temperaturas de 5 fumarolas, transmitiendo estos datos a la Universidad de Colima, a 25 km. del volcán; aproximadamente cada 3 meses se debía subir a la cima a realizar mantenimiento y reparaciones al sistema.^{8,9,10}
 - En el cráter del Monte Rainier, Washington, E.U. 1972, se monitorearon 3 fumarolas (lado oeste del cráter) durante 5 semanas. Los datos analógicos eran digitalizados y enviados al satélite Nimbus 4, para luego ser recibidos en Alaska y posteriormente, por líneas de comunicación terrestre, al Centro Espacial de Vuelos Goddard.^{11,12}
 - En Vulcano, Italia, se monitorearon las temperaturas de fumarolas automáticamente entre los años 1987 y 1991, con termopares.¹³

1.3.1.2 Por sensor remoto

Como su nombre lo indica, con este tipo de sensor, se mide la temperatura de manera remota, el instrumento que la detecta está lejos (no en contacto) con el objeto. El instrumento es sensible a la radiación infrarroja emitida por el objeto. El principio de funcionamiento se detallará más adelante. El monitoreo térmico remoto se realiza por medio de termografías que son *fotografías en el espectro térmico tomadas por satélites y/o aviones de percepción remota*. Como ejemplo de uso de estas termografías, se puede citar:

- Termografías obtenidas por satélite, tierra y aire de los volcanes Stromboli y Vulcano, en Italia, con las que se ha podido calcular las temperaturas de fumarolas, así como las del *domo de lava*.¹⁴

⁷ Información adquirida vía e-mail de Harris A.J.L., 9/97 y 10/97

⁸ Información adquirida vía e-mail de Hams A.J.L., 9/97 y 10/97

⁹ Información adquirida vía e-mail de Wooster M.J., 5/9/97

¹⁰ Información adquirida vía e-mail de Connor C., 5/10/97

¹¹ Información adquirida vía e-mail de Harris A.J.L., 9/97 y 10/97

¹² Información adquirida vía e-mail de Wooster M.J., 5/9/97

¹³ Información adquirida vía e-mail de Wooster M.J., 5/9/97

¹⁴ Hams, A.J.L. y Stevenson D.S., *Thermal observations of degassing open conduits and fumaroles at Stromboli and Vulcano using remotely sensed data*. p. 175.

- En el Monte Spurr (1992) y Redoubt (1989-1991) en Alaska, se utilizaron fotos de satélites meteorológicos para detectar la pluma a partir de sus propiedades térmicas.¹⁵
- En el volcán Láscar (1993) en Chile, los cielos despejados y la baja concentración de vapor de agua, permitieron buenas imágenes del domo de lava por medio de satélite.¹⁶
- En el volcán Kilauea de Hawai, las continuas erupciones han permitido utilizar varias tecnologías para estudiar las propiedades térmicas del flujo de lava utilizando técnicas de percepción remota, basadas en fotografías por satélite y aéreas. Se ha determinado la distribución de temperaturas del flujo en el lecho de lava del Kupaianaha. Se utilizaron imágenes de Landsat para medir la energía térmica que tenía dicho flujo. Se ubicaron cavidades con lava a solo 5 metros de la superficie.¹⁷
- En el volcán Etna (1991-1993) de Italia, se midió el flujo de SO₂ por medio de técnicas de percepción remota en el infrarrojo térmico (8-12 μ m), utilizando una aeronave.¹⁸

Este tipo de monitoreo remoto, ya sea desde satélite o desde una aeronave, tiene la ventaja de conocer la dirección, alcance, temperatura y dimensión de la fumarola. Además se puede conocer la distribución de temperaturas en un campo de lava. Sin embargo, el evento volcánico puede no coincidir con:

- la órbita de un satélite de percepción remota que lo pueda fotografiar,
- el vuelo efectuado para ver las condiciones del volcán,
- un día que se tenga un buen clima o que el cielo se encuentre despejado para que las tomas desde el satélite o aeronave sean claras; el infrarrojo no traspasa nubes.

En el caso de las imágenes de satélite, se tiene como desventaja su alto costo (cerca de los 4000 dólares por imagen) y su disponibilidad poco inmediata (meses después del encargo). La resolución espacial en este tipo de imágenes (Thematic Mapper: TM) puede ser de hasta 30 m por píxel para temperaturas mayores a los 120 °C y 120 m por píxel para temperaturas de -60 °C a 120°C. En otro tipo de imágenes, como las del tipo AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) la resolución es de 1.1 km por píxel. Las imágenes TM de un mismo lugar se obtienen con un período de 16 días. Para las imágenes AVHRR, el período es de hasta 6 horas.¹⁹

¹⁵ Self S. y Mougins-Mark P.J., *Volcanic eruptions, prediction, hazard assessment, remote sensing, and societal implications*, <http://earth.agu.org/revgeophys/self00/self00.html>

¹⁶ *Ibidem*

¹⁷ *Ibidem*

¹⁸ *Ibidem*

¹⁹ Harns, A.J.L y Stevenson D.S. , *Op Cit*, p 175-180

1.4 Necesidad de un monitoreo térmico en el volcán Popocatepetl

Como se mencionó al describir el monitoreo del volcán Popocatepetl, no se cuenta hasta ahora con algún monitoreo térmico.

Para conocer el estado del volcán, es importante saber la energía que está disipando, la cual está compuesta por dos tipos de energía: la térmica y la mecánica. Con los datos generados en el monitoreo térmico se podrá estimar la energía térmica disipada.

Este tipo de monitoreo permitirá además, detectar anomalías térmicas en el edificio volcánico. En el caso de una erupción mayor, se podrá detectar la presencia de flujos de lava o ceniza descendiendo del volcán, así como fracturas, fallas, etc. en el cuerpo de éste.

El monitoreo térmico propuesto proporcionará principalmente las temperaturas de las fumarolas y de las exhalaciones del volcán. Las fumarolas y las exhalaciones son las manifestaciones de actividad volcánica más obvias y la principal fuente de liberación de energía térmica del volcán en el estado actual de actividad. Las temperaturas de las fumarolas, o de las exhalaciones, pueden cambiar antes de hacer erupción, por lo que pueden proveer información crítica del estado de actividad del volcán. Normalmente el cambio de temperaturas en las fumarolas es rápido. Por ejemplo, en el caso del volcán Poás de Costa Rica, creció su temperatura por más de setecientos grados en un mes, en 1980. El aumento de temperatura en fumarolas por periodos de meses o años, son usualmente el precursor más patente de alerta o actividad volcánica.²⁹

El monitoreo térmico del volcán Popocatepetl proporcionará los datos antes mencionados, que permitirán conocer mejor su estado, así como tener nuevos parámetros de referencia en caso de un cambio de actividad. Este monitoreo, a diferencia de los existentes en otros volcanes, puede ser constante al estar siempre disponible y no depender de la programación de un vuelo o salida de campo, ni de la coincidencia de la órbita de un satélite.

²⁹Connor, C B et al., *Continuous monitoring of high-temperature fumaroles on an active lava dome, Volcán Colima, México: Evidence of mass flow variation in response to atmospheric forcing*, p. 713

1. Introducción



Foto 1.1 Volcán Popocatépetl.



Foto 1.2 Instalaciones y procesamiento de información del volcán en CENAPRED



Foto 1.3 Fachada exterior del CENAPRED

2 Equipo térmico disponible

2.1 Descripción y funcionamiento del equipo

El equipo térmico disponible fue manufacturado por la compañía NEC San-Ei Instruments y donado por Japón a través de JICA (Japan International Comition Agency). Llegó al Instituto de Geofísica en junio de 1996

Este equipo es un sistema portátil termográfico infrarrojo, de alta sensibilidad, mostrado en la Foto 2.1. Es capaz de escanear ópticamente las radiaciones infrarrojas emitidas de forma natural por el objeto en medición. Las señales infrarrojas son escaneadas y convertidas en señales de datos en dos dimensiones para proporcionar una imagen termográfica (imagen de distribución de temperaturas). Las señales analógicas capturadas por el detector (TH3104MR), alimentan a la unidad de control (TH31-366.) Es aquí donde son procesadas para desplegar una imagen a color o monocromática en una pantalla de cristal líquido, LCD.

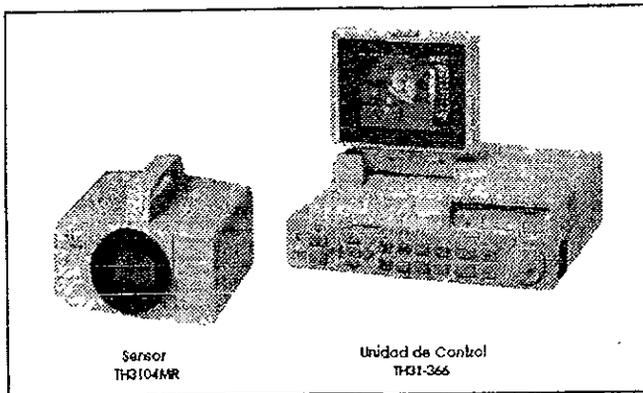


Foto 2.1 Equipo térmico disponible

2.1.1 Cámara detectora infrarroja (Thermo Tracer TH3104MR)

El detector infrarrojo, hecho de HgCdTe (Mercury-Cadmium-Telluride), es enfriado por un refrigerador de efecto termoeléctrico interconstruido, característica que le permite mantenerse en operación por largos periodos de tiempo, captando temperaturas entre los -10 a 2000°C en distintos rangos, con una resolución de 12 bits. A continuación se presenta la Tabla 2.1 con las características principales del sensor ²¹

²¹ NEC San-Ei Instruments Ltd, *Thermo Tracer TH3100 Series Control Unit Operation Manual*, p. 5-10 a 5-12

2. Equipo térmico disponible

# Rango	Rango 1	Rango 2	Rango 3
Rango de temperaturas medidas	-10 a 200°C	0 a 800°C	200 a 2000°C
Precisión ETR, Escala Total del Rango	±1.0% ETR	±1.0% ETR	±1.0% ETR
Rango de temperatura	-10 a 200°C	0 a 800°C	200 a 2000°C
Sensibilidad	0.3 a 30°C/DIV	0.5 a 50°C/DIV	1 a 200°C/DIV
Longitud de onda medida (media onda)	3 a 5.3 μm		
Resolución horizontal	A partir de 261 líneas (2.0 mrad)		
Líneas escaneadas	207		
Ángulo escaneado	30° horizontal x 28.5° vertical (sin zoom óptico)		
Tiempo de adquisición por imagen	0.8 seg.		
Corrección de emisividad	0.1 a 1.00 (resolución de 0.01)		
Distancia focal	20cm a ∞		
Zoom óptico H: dirección horizontal; V: dirección vertical	Zoom normal: x1 a x5 (resolución de 0.1 en H y V) Zoom independiente: x1 a x5 (resolución de 0.1 en H o V)		
Periodo de mantenimiento	Motor del chopper: 10000 hrs. Galvanómetro H: 10000 hrs. Galvanómetro V: 15000 hrs.		
Rango de temperatura durante operación	0 a 40°C		
Rango de temperatura en almacenamiento	-20 a 50°C		
Fuente de poder	+12V±1V, -12V±1V		
Consumo de potencia Cantidad aproximada	15W		
Dimensiones	192±3 (ancho) 144±5 (alto) 176±3 (largo)		
Masa	3.0kg		

Tabla 2.1 Especificaciones generales del sensor TH3104MR

2.1.2 Principio de funcionamiento de los sensores infrarrojos

2.1.2.1 Descubrimiento de la radiación infrarroja

En el año de 1800, mientras que usaba un prisma para dispersar la luz del sol en sus componentes (o longitudes de onda), el astrónomo británico Sir William Hershel (1738-1822) descubrió que existía energía radiante más allá del espectro visible. Utilizando un termómetro, Hershel observó que en diferentes secciones del espectro, aun en las que no se tuviera color, existía un efecto *calorífico no esperado*. A este rango se le llamó infrarrojo por encontrarse más allá del rojo en el espectro, además esta banda se empezó a estudiar por su correlación que tenía con la temperatura de los cuerpos. Se emplearon entonces detectores para sensar

cambios en la temperatura, conocidos como detectores térmicos, cada vez más sensibles a pequeños cambios de temperatura.

2.1.2.2 La radiación infrarroja

La radiación infrarroja (IR) es una forma de energía electromagnética que obedece las mismas leyes que gobiernan a la luz visible, las ondas de radio y los rayos x. Lo que diferencia entre sí las ondas electromagnéticas es su longitud de onda. La radiación infrarroja es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas en la zona del espectro situada inmediatamente después de la zona roja de la radiación. La longitud de onda de los rayos infrarrojos es menor que la de las ondas de radio y mayor que la de la luz visible (Figura 2.1). Las radiaciones infrarrojas son emitidas por los cuerpos al calentarse, lo que supone que una parte del calor emitido se invierte en aumentar las vibraciones de los átomos.

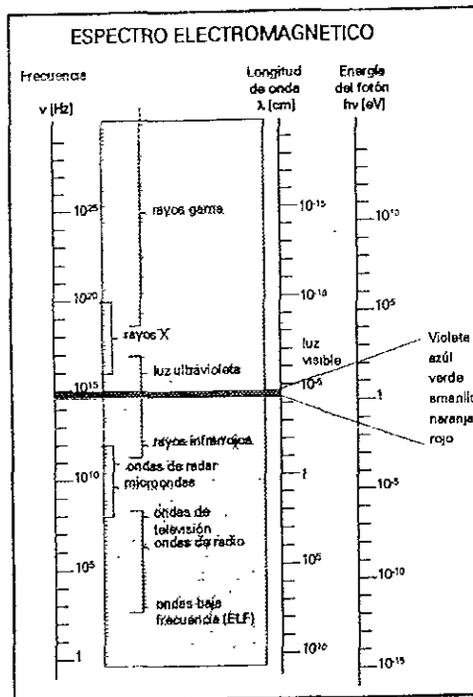


Figura 2.1 Espectro electromagnético.

El rango entre 2.0 y 6.0 μm es conocido como el infrarrojo cercano, y el rango entre 8.0 y 15.0 μm es conocido como infrarrojo lejano. El rango entre 6.0 y 8.0 μm es considerado como inservible por la tecnología infrarroja ya que la humedad del ambiente absorbe la radiación de esta banda a una distancia muy pequeña de la fuente de emisión.

2. Equipo térmico disponible

Normalmente el equipo para medir temperatura está diseñado para el infrarrojo lejano o para el cercano. En general el equipo que trabaja en el infrarrojo cercano, es más sensible a temperaturas altas y el que trabaja en el lejano, lo es a temperaturas bajas.

Las radiaciones infrarrojas viajan básicamente en línea recta, no penetran metales a menos que éstos sean muy delgados; pasan a través de varios materiales cristalinos, plásticos y gaseosos. La atmósfera terrestre es una ventana para este tipo de radiaciones, especialmente entre los 3 y 12 μm ; es por eso que los principales sensores infrarrojos son sensibles a este ancho de banda.

2.1.2.3 Transductores de radiación infrarroja

Un transductor es un elemento que convierte un tipo de señal en otra. El detector de IR es un transductor que convierte señales infrarrojas en eléctricas. La radiación recibida y la señal eléctrica generada son descritas en términos de longitud de onda, frecuencia, potencia y distribución espectral.

Para caracterizar un detector IR, se emplean diferentes parámetros. Entre ellos, se debe considerar:

- **Respuesta:** es la relación entre la señal de salida sobre la de entrada IR en el detector de temperatura
- **Ruido:** son señales parásitas que tienden a esconder la señal verdadera. Es una señal que aparece en la salida y que no forma parte de la señal deseada correspondiente a la de la entrada. Esta señal no se puede anular completamente, pero siempre se quiere minimizar, ya que su presencia obscurece o esconde señales pequeñas que no pueden ser recuperadas posteriormente. Existen diversas fuentes de ruido, como son la interferencia eléctrica (motores, líneas de AC, etc.), las fluctuaciones de temperatura, y las vibraciones que modifican el estado de componentes eléctricos.
- **Relación Señal – Ruido:** es una medida de fidelidad o limpieza de la señal de salida. Es la relación entre la señal de voltaje dividido entre el valor rms del voltaje correspondiente al ruido.
- **Potencia equivalente del ruido:** es la potencia mínima a la que el detector infrarrojo es sensible.
- **Respuesta lineal:** este parámetro establece si la salida del detector aumenta de manera lineal en determinados rangos de la señal incidente. Se llega a un punto en el que la señal de entrada es tan intensa que el detector se empieza a saturar y ya no obtiene la correspondiente señal de salida de manera lineal.
- **Rango dinámico:** es el rango de IR en que el detector puede ser útil. Se define como la relación entre dos intensidades; la intensidad máxima y la mínima que se puede medir.

- Respuesta en frecuencia: es el comportamiento de la respuesta ante cambios en frecuencia de la señal eléctrica. El detector o sistema (detector y la electrónica involucrada) se comportará como un filtro "paso bajas"; es decir, para mayores frecuencias de la frecuencia de corte, el circuito no responderá.
- Respuesta espectral: es la respuesta ante cambios de longitud de onda de la señal infrarroja.
- Respuesta de frecuencia espacial: es la medida de la variación de la respuesta ante objetivos con menor tamaño al ser enfocados por el detector.
- Crosstalk: señal existente en un detector causada por una gran señal en un detector cercano.

2.1.2.4 Principio del detector

La ley de Planck establece que para cualquier fuente dada algunas longitudes de onda transmiten mayor potencia que otras. Este comportamiento fue observado por vez primera por Lummer y Pringsheim en 1899. Su explicación la dio Max Planck en 1900, cuando obtuvo una ecuación que corroboraba los datos obtenidos. Su deducción asumía que los osciladores que producían estas radiaciones estaban limitados a niveles discretos de energía (E) asociados a la frecuencia ν de la radiación, pudiendo tener energía de $h\nu$, $2h\nu$, etc., pero no $1.2h\nu$ o $3.7h\nu$, donde h es la constante de Planck ($h=6.63 \times 10^{-34}$ Joule-seg). Esta Ley es utilizada para calcular la energía de la radiación infrarroja emitida por cualquier fuente. Esta ley se deriva de la ecuación siguiente:

$$E = h\nu$$

La ecuación de Planck también se puede expresar de la siguiente manera:

$$e_{\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)} \left[\frac{W}{\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}} \right]$$

En donde: e_{λ} es la energía radiada por un cuerpo negro por segundo por unidad de área por micrómetro
 c : velocidad de la luz 3×10^8 m/s
 T : temperatura absoluta de cuerpo negro en K
 σ : es la constante de Stephan-Boltzman, $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ watt/m² K⁴

En la Figura 2.2 se grafica la ley de Planck para varias temperaturas, algunas observaciones sobre ésta figura se mencionan a continuación:

- Entre más caliente esté el cuerpo, mayor energía es emitida.

2. Equipo térmico disponible

- Entre más se incremente la temperatura de un cuerpo, la longitud de onda de la mayoría de la energía emitida, decrece.
- La curva descrita por la Ley de Planck es sencilla cuando describe longitudes de onda determinadas; compleja, cuando se quiere modelar a toda la curva.

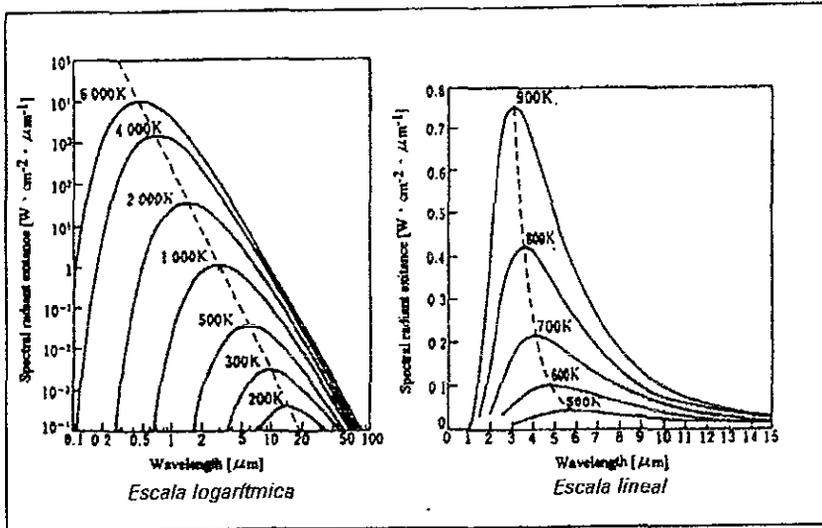


Figura 2.2 Radiación de cuerpo negro: Ley de Planck

El principio de funcionamiento del detector se basa en la integral de la ecuación de Planck, la ecuación de la ley Stefan-Boltzmann, la cual integra la ecuación de Planck de 0 a infinito y de donde se obtiene la energía de los rayos infrarrojos por unidad de área. En esta ecuación, se determina la relación entre la temperatura absoluta de un cuerpo negro y la energía de un rayo infrarrojo, con ella, se puede determinar *directamente la temperatura a partir de la energía*. La ecuación es:

$$e = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^3 h^3} T^4 = \sigma T^4 \left[\frac{W}{cm^2} \right]$$

En donde, e : es la energía radiada por un cuerpo negro por segundo por *unidad de área*
 λ : es la longitud de onda
 σ : es la constante de Stephan-Boltzman, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ watt/m² K⁴
 T : es la temperatura absoluta del cuerpo negro. [K]

2.1.2.5 Funcionamiento del detector

Para el caso del equipo disponible, el detector funciona básicamente de la siguiente manera.

La energía infrarroja es escaneada ópticamente y enfocada por lentes objetivos transparentes al infrarrojo y muestreada con una fuente de temperatura de referencia. Esta energía es conducida al dispositivo detector hecho a base de HgCdTe (Mercury - Cadmium - Telluride). Se tiene la sensibilidad para cubrir la banda del infrarrojo cercano de 3 a 5.3 μm . El detector debe forzosamente ser enfriado por un dispositivo para proporcionar una medición apropiada en tres niveles de temperatura: RANGO 1, RANGO 2 y RANGO 3; que corresponden a los niveles bajo, mediano y alto, respectivamente, de acuerdo a las características específicas del detector.

El detector infrarrojo está formado por un sistema complejo, los rayos infrarrojos son primeramente modulados por un dispositivo de muestreo o chopper; disco con orificios, que al girar deja pasar una porción de la radiación hacia el resto del sistema. El rayo pasa a través de una serie de ventanas y filtros, que permiten el paso de la longitud de onda deseada, hasta llegar al detector en sí. Esta serie de interfaces aseguran que el rayo medido sea lo más limpio posible, además de separar distintas cámaras al vacío para prevenir la condensación de humedad y la evaporación de algunas sustancias enfriadoras. El detector puede ser enfriado por distintos tipos de refrigerador. Las señales del transductor de infrarrojo son llevadas a través de las cámaras al vacío a un circuito electrónico para ser procesadas. Los cambios de resistencia son convertidos en cambios eléctricos, sus voltajes son amplificados y un filtro eléctrico elimina las frecuencias que no son de interés, mejorando la relación señal – ruido de la señal, lista para ser almacenada.

Los detectores deben ser enfriados ya sea porque no pueden operar a temperatura ambiental o porque operan mucho mejor si se les enfría. Este requisito complica su uso ya que un medio de enfriamiento tiene que estar presente y el detector tiene que ser montado sobre este para que permanezca frío, sin ser afectado por problemas de condensación además de ser accesible a los rayos infrarrojos.

El sensor TH3104MR es enfriado con un refrigerador que funciona a base de efecto termoeléctrico o Peltier. La baja temperatura la logra al forzar el paso de una corriente a través de una unión de pares metálicos. Estos detectores son pequeños, simples y confiables; no generan ruido y pueden operar en cualquier orientación. Tienen dos grandes desventajas: para llegar a un nivel de temperatura bajo consumen una gran potencia además de tener limitantes para conseguir temperaturas muy bajas.²²

Otra manera de enfriar a los detectores es a base de refrigeradores. Estos medios normalmente incorporan los mismos medios de aislamiento del detector pero además, tanto el

²² VINCENT, John David. *Fundamentals of infrared detector operation and testing*. p. 44

2. Equipo térmico disponible

refrigerador como el refrigerante tienen que recibir mantenimiento. Existen dos tipos principales de refrigeradores. de ciclo cerrado, los cuales reciclan el mismo fluido (normalmente helio) y de ciclo abierto, los cuales poco a poco se ventilan a la atmósfera al terminar su tarea de enfriamiento. Algunos son a base de criógeno (un líquido muy frío), nitrógeno líquido, etc. El detector es usualmente colocado firmemente en una cámara al vacío que cumple dos propósitos: aísla el líquido enfriador para que no se evapore y evita el problema de condensación al no estar en contacto con la humedad del aire. Para reducir la transmisión de calor, los soportes mecánicos se hacen tan pequeños como sea posible y se utilizan materiales especiales.

Otro sistema de enfriamiento es por radiación. Este es utilizado en aplicaciones espaciales ya que no se requiere de un fluido para enfriar al detector por la temperatura a la que se encuentra. Además, este sistema no tiene partes móviles a excepción del mecanismo requerido para evitar que ver al sol directamente

2.1.2.6 Tipos de detectores

Existen varios tipos de detectores; los más comunes son a base de InSb, HgCdTe y sales de plomo como PbS y PbSe. Los detectores a base de InSb, tienen una frecuencia de corte de aproximadamente $5.5 \mu\text{m}$ y el pico en su respuesta espectral en aproximadamente $5.0 \mu\text{m}$. Son muy sensibles a la electricidad estática que pasa por el circuito, son frágiles y de uso delicado ya que radiaciones UV y visible provocan, momentáneamente, un cambio químico en el material que aumenta su susceptibilidad. Los detectores a base de HgCdTe, son una combinación entre HgTe y CdTe. Las concentraciones relativas de las dos moléculas son deliberadamente ajustadas en el proceso de elaboración para fabricar la mezcla y así obtener la frecuencia de corte y temperatura deseada. El material puede ser cortado, traslapado y pulido para lograr el grosor deseado, o puede ser procesado para convertirse en sustrato de vapor o líquido. Son frágiles ya que la mayoría de las veces el material es muy delgado. Finalmente, los detectores a base de sales de plomo son depósitos de soluciones químicas en sustratos. La película resultante es de 1 a $2 \mu\text{m}$ de grosor. La composición química de las sales de plomo puede ser ajustada para el rango a temperaturas a medir. Por sus dimensiones, estos detectores son muy delicados: muy sensibles a altas temperaturas, a cargas electrostáticas, a humedad, inclusive hasta el mismo respirar de las personas puede perjudicar permanentemente al detector. Es por eso que se conservan en lugares al vacío.

2.1.2.7 Alternativas de equipos térmicos

Por referencia, se buscaron equipos alternativos con los restantes en el mercado. Existen tres criterios básicos para la elección de estos.

El primer criterio es de tipo económico, ya que los precios varían de una forma muy importante de acuerdo a la marca y a las funciones que desarrolla el equipo.

El segundo criterio es el rango de temperaturas que se maneja y el espectro del infrarrojo que se utiliza. Esto varía según la aplicación para lo que se quiera emplear. el infrarrojo cercano es mejor para temperaturas elevadas, debido a una mayor resolución para estas temperaturas. El infrarrojo cercano es empleado para temperaturas menores y es menos sensible a los reflejos del sol, por lo que funciona mejor para aplicaciones de exterior durante el día.

Finalmente el tercer criterio básico para la selección del equipo es el método de enfriamiento empleado, ya que esto determinará la confiabilidad de los resultados obtenidos, la vida útil del equipo así como el tiempo en el que se puede emplear de forma continua.

Como ejemplos de equipos térmicos similares, se pueden mencionar:

De la misma compañía NEC existen equipos detectores, de la misma familia, que emplean el mismo tipo de enfriamiento u otro similar pero en el infrarrojo lejano. El precio varía entre los US\$ 34,000 y US\$37,000²³. El rango en estos equipos es de -50 hasta los 2000 ° C.

Otra alternativa es de otra compañía Japonesa, Nikon, misma que ofrece un modelo LAIRD 3, que básicamente tiene las mismas características del equipo con el que se cuenta (método de enfriamiento, banda de infrarrojo con el que trabaja, etc) Sin embargo, este equipo tiene la posibilidad de conectarse directamente a una PC, sin necesidad de una tarjeta especial. El precio de este equipo es de aproximadamente US\$55,000

Existen compañías como "Inratec", cuyo equipo puede ser tanto en el infrarrojo lejano como el cercano. El equipo de esta compañía está diseñado para trabajar las 24 horas, es controlado por una computadora personal, y puede mandar al centro de monitoreo, las temperaturas de la imagen cada segundo por una canal digital. Desafortunadamente, la compañía no ha dado respuesta a la cotización que se les solicitó, es por eso que se desconoce el precio del equipo.

²³ Precios del distribuidor "ebs Systemtechnik GmbH" de Alemania

2.1.3 Estructura interna y funciones del equipo térmico

2.1.3.1 Estructura de la unidad detectora

La unidad detectora es la parte del sistema que se encarga de convertir las radiaciones infrarrojas captadas en señales eléctricas. Esta unidad, TH3104MR, cuenta con distintos bloques que van desde el transductor hasta el control, el enfriamiento, etc. En la Figura 2.2 se pueden ver las dimensiones, en mm del sensor. La Tabla 2.2 explican cada uno de los bloques principales que conforman al detector internamente, y en la Figura 2.3 se muestra a nivel de bloques

BLOQUE	FUNCIÓN
Ventana de rayos infrarrojos	Este ventana permite el paso únicamente de los rayos infrarrojos para la medición, mientras filtra los rayos visibles, polvo y suciedad. La ventana está hecha a base de silicio.
Dispositivo óptico	El objeto a medir es escaneado al moverse dos espejos ópticos (espejos horizontales y verticales)
Lentes objetivo	Convergen los rayos infrarrojos escaneados por los espejos ópticos.
Chopper	Rota en sincronía con el sistema de escaneo horizontal para cortar (chop) los rayos infrarrojos incidentes.
Controlador del detector	Controla el procesamiento y las instrucciones de operación para cada circuito de control de la unidad detectora.
Circuito interno de medición de temperatura	Mide la temperatura interna del detector de rayos infrarrojos para eliminar efectos adversos por la radiación infrarroja interna.
Controlador del galvanómetro	Circuito electrónico usado para controlar el escaner horizontal y vertical.
Controlador del enfoque	Posiciona los lentes objetivos de acuerdo con la señal de posición del enfoque.
Controlador del chopper	Posiciona el motor del chopper en sincronía con la señal del escaneo horizontal.
Detector	Convierte las energías infrarrojas convergidas en señales eléctricas.
Enfriador	El enfriador es de tipo termoeléctrico, opera en forma semi-permanente, por lo que puede operar por periodos prolongados de tiempo.
Circuito controlador del enfriador	Este circuito detecta la temperatura del detector y la enfría hasta un nivel de temperatura que le permita una operación estable.
Preamplificador	Diseñado como circuito de bajo ruido y alta sensibilidad para amplificar las señales eléctricas obtenidas por el detector.
Procesador de señal	Corrige varias señales eléctricas y luego las convierte a señales de temperatura.
Fuente de poder	Convierte la entrada de $\pm 12V$ al voltaje requerido por cada circuito de la unidad
Conector	Este cable conector es usado para conectar la unidad detectora con la unidad de control.

Tabla 2.2 Bloques que conforman internamente al detector

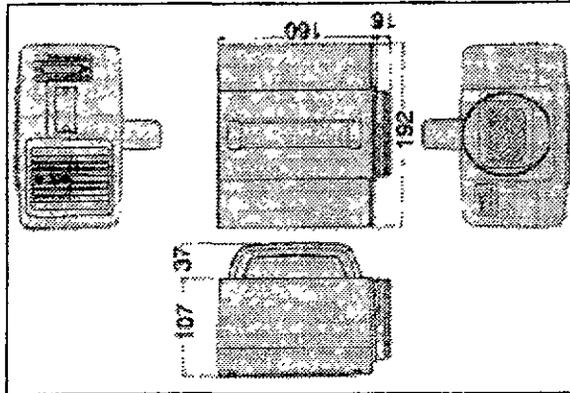


Figura 2.3 Dimensiones en mm del detector

El detector es de tamaño pequeño, lo que permite su portabilidad. El detector se conecta a la unidad de control mediante un cable con conectores DB25, siendo la salida de éste analógica. La siguiente figura muestra las formas y dimensiones del detector.

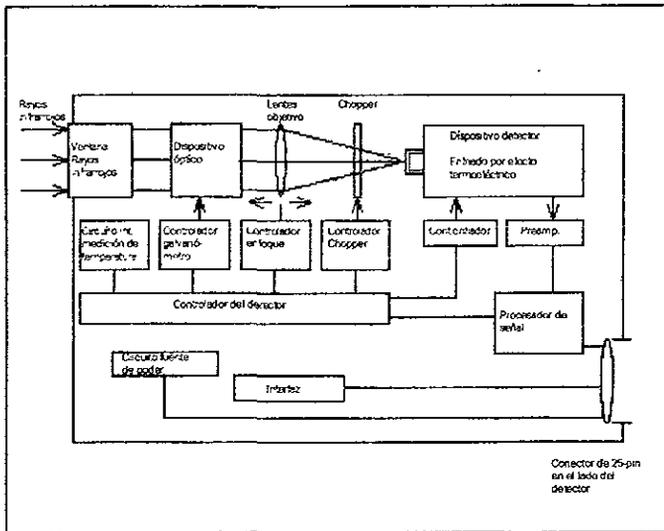


Figura 2.4 Esquema del detector TH3104MR

2.1.3.2 Estructura de la unidad de control

Esta unidad, TH31-366 de NEC, se encarga de procesar las señales analógicas de temperatura recibidas de la unidad detectora y controlar el sistema de escaneo. Los datos

2. Equipo térmico disponible

correspondientes a la temperatura son guardados en la memoria asignada a la imagen; el procesamiento es realizado de acuerdo al modo de despliegue para presentar la imagen termográfica u otros datos, en una pantalla de cristal líquido LCD de 5.7". Se puede almacenar la imagen tanto en una unidad de discos flexibles de 3.5" (Cada disco con formato HD es capaz de almacenar hasta 13 imágenes) o en un disco duro interno (hasta 5000 imágenes). Esta unidad es la interfase que interpreta los datos obtenidos por el detector, convirtiéndolos en imágenes, a través del cual se puede controlar el detector. Es entonces un procesador dedicado a la comunicación con el detector.

El funcionamiento de esta unidad de control, así como una explicación breve de los subsistemas que la integran se describe en el Apéndice A.

2.2 Resultados Preliminares

Con el fin de justificar el proyecto de monitoreo térmico, se realizaron diversas salidas de campo por tierra y aire, con el equipo en su forma portátil, durante un periodo de 1 año. El objetivo de estas salidas fue el de probar su funcionalidad para un monitoreo de tipo térmico del volcán Popocatepetl. Así, se podría conocer el funcionamiento del equipo en el lugar donde se efectuarían las mediciones por tiempos prolongados. En estas visitas se midieron las temperaturas de algunas de las laderas del volcán y de fumarolas desde diferentes puntos lejanos. La distribución de temperaturas del interior del cráter del volcán también era desconocida, por lo que el equipo también fue usado para realizar varios vuelos por helicóptero sobre el cráter del mismo. En general, se obtuvieron resultados y observaciones interesantes.

2.2.1 Por tierra

Las visitas de campo consistieron en llevar el equipo a diversos puntos localizados alrededor del volcán. En cada punto, se fijó la cámara en un trípode y se obtuvieron diversas termografías, para diferentes estados de actividad del volcán. En algunos puntos se detectaron anomalías en las imágenes térmicas. Se obtuvieron tomas en la noche y madrugada para evitar los efectos térmicos provocados por el reflejo de la luz solar sobre los cuerpos. Como resultado de esta serie de mediciones, se comprobó que el equipo servirá para detectar ciertas irregularidades. A continuación se describirán brevemente anomalías y fumarolas detectadas, que ilustran el tipo de resultados esperados con un monitoreo térmico continuo.

En la ladera Sur-Este del volcán se encontró una anomalía de bajo nivel sobre el edificio volcánico, como se observa, en la Foto 2.3, visible y en la Foto 2.4, en infrarrojo. Las imágenes fueron obtenidas desde una localidad cercana a Metepec, Pue., a una distancia de 12 km del

labro inferior del cráter. La anomalía está representada por una zona que tiene una temperatura mayor a la de su alrededor (de 1.5°C).

Desde este mismo punto, se detectó una emisión de gas caliente del cráter, aunque incoloro a la vista, con el equipo térmico se determinó su distribución de temperaturas, su dimensión y su duración.

Se captaron algunas sucesiones de imágenes desde el Cerro de Alzomoni, Edo. Méx., donde se pudieron determinar las diferencias térmicas entre nubes y fumarolas. La distribución de temperaturas en las emanaciones era muy notoria en las imágenes térmicas, así como el rumbo que seguía la fumarola. La fumarola en cuestión se corroboró con los registros sísmicos de la estación Canario, pudiendo comprobar la relación de los diferentes parámetros que se monitorean del volcán. Se presentan a continuación las imágenes visible e infrarroja correspondientes, captadas desde este punto el día 17 de septiembre de 1997 (Foto 2.2, Foto 2.5 y Foto 2.6). Se puede apreciar fácilmente la distribución de temperaturas de la fumarola. Se presenta también el registro sísmico de ese mismo evento.

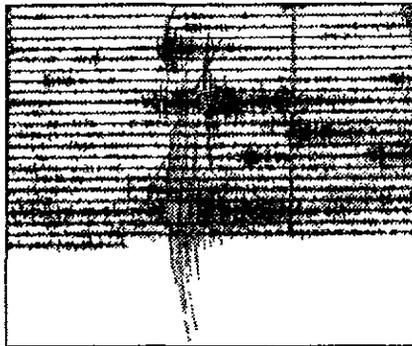


Foto 2.2 Registro sísmico (CENAPRED) de la estación Canario del evento que provocó la fumarola de la Foto 2.5 y Foto 2.6.

Las imágenes capturadas desde las cercanías de Metepec, Pue., indican temperaturas que no son del todo lógicas: nieve a 12°C y cielo a 5°C. Por el otro lado, en las capturadas desde el Cerro de Alzomoni, las temperaturas son más coherentes: nieve entre 4 y 5°C y el cielo con temperaturas inferiores a los 0°C. El análisis de estas mediciones no se realizará en este trabajo por encontrarse fuera de su objetivo, sin dejar por ello de ser sumamente importante para la interpretación de las imágenes térmicas.

Dado que el sensor detecta las emisiones infrarrojas que provienen de los cuerpos, se observó que las nubes interfieren de manera considerable, generan una dispersión de la radiación infrarroja ambiental y entorpecen la identificación de elementos en la imagen. Las

2. Equipo térmico disponible

imágenes tomadas en la noche son mucho más nítidas que las del día ya que por lo general hay pocas nubes alrededor del volcán en la noche, y los cuerpos ya no reflejan la radiación solar.

2.2.2 Por aire

Los vuelos se realizaron en un helicóptero de la Procuraduría General de la República modelo Bell 412. Se voló a un lado del volcán con una vista diagonal al cráter a una distancia aproximada de 400 m de los bordes del cráter.

Las radiaciones infrarrojas no traspasan las ventanas del helicóptero, por lo que los vuelos se efectuaron a puertas abiertas durante las mediciones.

En uno de los viajes se colocó una cámara visible que filmara en paralelo a la infrarroja, con objeto de poder interpretar con mayor facilidad los bordes del cráter. Esto es debido a que las imágenes sin una referencia visual, son muy difíciles de interpretar.

Los resultados obtenidos revelaron que el domo de lava del volcán tenía una temperatura superficial máxima de 196°C.²⁴ En el segundo vuelo se observó un aumento en las temperaturas, ya que se tenía una superficie con apariencia circular con temperaturas por arriba de los 150°C y un punto máximo con 557°C.²⁵ En un tercer vuelo se registraron temperaturas no superiores a los 380 °C.²⁶ En Foto 2.7 y en la Foto 2.8 se muestran las imágenes, visible y térmica, respectivamente, del domo de lava del volcán el día 9 de diciembre de 1997.

2.2.3 Conclusiones de los resultados preliminares

Las visitas de campo no sólo proporcionaron información acerca de la distribución de temperaturas dentro del cráter, sino también sobre anomalías presentadas sobre las laderas. Así, se pudieron encontrar anomalías, zonas con mayor temperatura que las de su entorno, una de ellas, ubicada en la ladera Este - Sureste del volcán, teniendo una temperatura de 1.5 °C por arriba de la temperatura promedio de la ladera. Anomalías que, de una manera sencilla y remota, pudieron ser identificadas.

Se comprobó la utilidad de un monitoreo térmico permanente, y en tiempo real. Se observó también la necesidad de cotejar las imágenes térmicas obtenidas con imágenes visuales, para poder interpretar y estudiar correctamente los resultados

²⁴Vuelo efectuado el 26 de octubre de 1996.

²⁵ Vuelo efectuado el 21 de febrero de 1997.

²⁶ Vuelo efectuado el 9 de diciembre de 1997

2. Equipo térmico disponible

La diferencia entre mediciones de temperatura, de un mismo cuerpo, captadas entre Metepec y Alztomoni se debe principalmente a la difracción de energía solar infrarroja por la atmósfera, entre el sensor y el objetivo.

La temperatura de una de las anomalías captadas, la menos perceptible, superaba en no más de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la temperatura general, de las laderas del volcán. Habiendo podido detectar esa variación, seguramente se captarían diferencias de estado en el glaciar, anticipando la posible formación de lahares y de flujos piroclásticos, con temperatura aproximada de 100 a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, que descendieran por la ladera del volcán.

2. Equipo térmico disponible

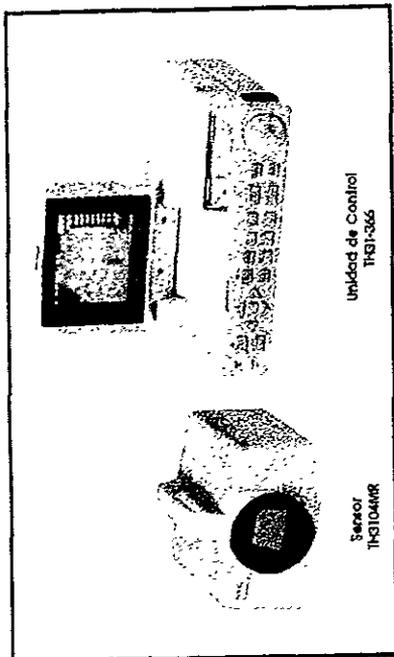


Foto 2.1 Equipo térmico disponible

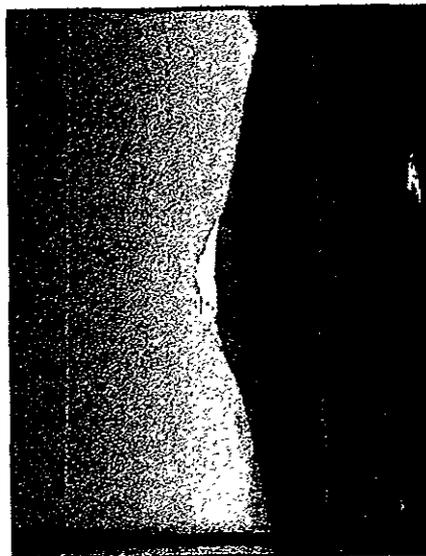
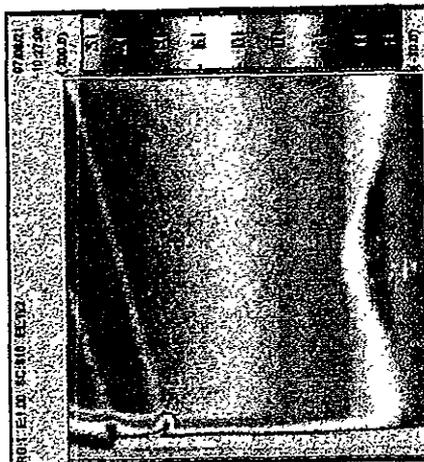


Foto 2.3 y Foto 2.4: imágenes visible e infrarroja desde Matepac Pue., anomalía en el lado Sureste.

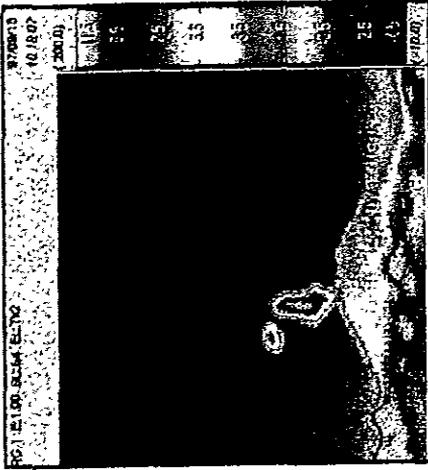
2. Equipo térmico disponible



Foto 2.5 y Foto 2.6: imágenes visible e infrarroja desde el carro de Alzomoni Ebo, Méx., fumeroles en las dos bandas del espectro.



Foto 2.7 y Foto 2.8: imágenes, visible y térmica, del domo de lava del volcán el día 9 de diciembre de 1997, vista Sur.



3 Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

Al tenerse un equipo capaz de captar temperaturas en forma remota, se pudo pensar en implementar un sistema de monitoreo del volcán, mismo que, como se indicó en un principio, ayudaría a aumentar los diferentes parámetros para conocer el estado del mismo. Con este objetivo, se procedió a diseñar este sistema.

3.1 Requerimientos para establecer el monitoreo térmico

Dados los resultados preliminares obtenidos, se determinaron los requerimientos o características bajo los cuales el monitoreo térmico tenía que ser implementado.

El primero que se estableció fue la ubicación de la cámara. Se requiere que ésta esté situada en un lugar cercano al volcán para que cubra ciertas necesidades: capturar imágenes térmicas de fumarolas, del edificio volcánico (incluyendo el glaciar), así como de posibles erupciones mayores y flujos de ceniza.

Otra característica que debería cumplir el monitoreo es la posibilidad de poder obtener imágenes en forma periódica, programando al sistema para tomar una imagen cada determinado tiempo, y en forma inmediata, en vista de un evento, poder obtener una sucesión de imágenes en tiempo real. Ya que el sensor no puede estar en operación permanentemente, se requiere que sea accionada cada vez que se pretenda capturar imágenes, ya sea de modo automático o manual. Este último modo, permitiría capturar imágenes de eventos que sucedan de forma extraordinaria.

Se requería que el control del equipo térmico, así como la adquisición de las imágenes, estuviera en el centro de monitoreo del volcán Popocatepetl en CENAPRED; lugar en donde también las termografías serían estudiadas y procesadas.

3.2 Localización de la cámara térmica

Para cumplir estos requerimientos, se estableció que la cámara estuviese ubicada en un lugar estratégico que cumpliera con las siguientes características: la primera era que tuviera una vista del volcán *no demasiado alejada, pero que permitiera apreciar al edificio completo así como la fumarola que éste desprendiera*. La fumarola puede llegar a elevarse varios kilómetros. El lugar debería estar a una altitud considerable, ya que, como se estableció en los resultados preliminares, entre mayor sea la distancia entre el detector y el objetivo a la difracción de energía solar infrarroja por la atmósfera, será mayor. Por razones de seguridad, ante la

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

posibilidad de erupciones mayores, el lugar debía ser un sitio cerrado, al abrigo del clima y de los visitantes. Preferentemente, el lugar debía de contar con línea de vista al CENAPRED, ya que esto facilitaría de cierta forma la comunicación inalámbrica.

Los posibles lugares que se tuvieron en consideración fueron los siguientes.

a) Cerro Tlamacas

Este es un lugar relativamente seguro, con línea de vista al CENAPRED y con una altitud de 4000 msnm; sin embargo está ubicado a sólo 5 km del volcán por lo que las fumarolas no podrían ser apreciadas en su extensión. La apertura máxima que el equipo tendría horizontalmente, sería de sólo 2.5 km, esto se calcula de acuerdo a la Figura 3.1.

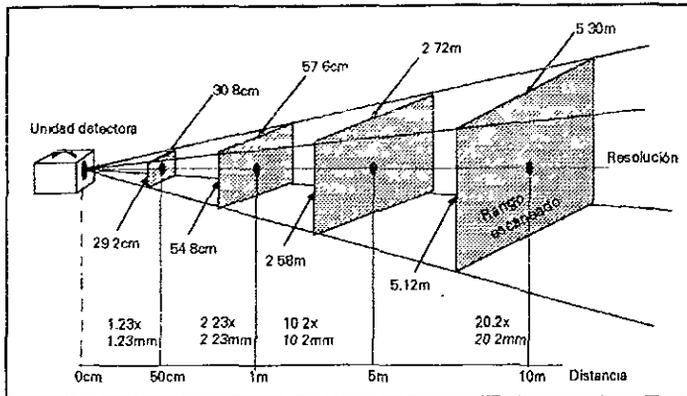


Figura 3.1 Gráfica de apertura del equipo dada por el fabricante.

b) Cerro de Alzomoni

Este cerro está ubicado a 11 km al norte del volcán a una altitud de 4000 msnm. Desde este punto, se podría monitorear al volcán por su lado Norte, lado en el que se encuentra su glaciar. Esto es importante, ya que de existir flujos piroclásticos, que se captarían por el monitoreo térmico, el glaciar se derretiría provocando devastadores flujos de lodo que podrían arrasarse poblaciones. Además, la distancia al volcán es adecuada para ver tanto al edificio volcánico como a las eventuales fumarolas que salgan de éste.

Desde el cerro Alzomoni, el cráter del volcán está a 11 Km. de distancia. Esto representa, de acuerdo a la apertura de la cámara (ver Figura 3.1), una imagen del volcán en un cuadro de aproximadamente de 6 x 5.7 km.

De acuerdo a las especificaciones del fabricante, la resolución horizontal del detector es de 2.0 mrad. Esto quiere decir que a una distancia de 11 km, cada pixel representa horizontalmente un arco de 22 m. Verticalmente, el detector escanea 207 líneas en un ángulo

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

de 28.5° (0.4974 rad), esto implica que la resolución vertical es de 2.4 mrad. Así, a 11 km, cada pixel representa verticalmente un arco de 26.4 m, por lo tanto el rectángulo que representa cada pixel desde el cerro de Altzomoni es de 22×26.4 m

En este sitio, *de mayor seguridad*, se cuenta con una caseta de monitoreo del CENAPRED, sin embargo, ésta no pudo ser utilizada ya que carece de vista hacia el volcán por distintas construcciones que fueron hechas a su alrededor.

En este mismo cerro, la compañía Televisa cuenta con instalaciones para *repetir su señal*. En estas instalaciones, el CENAPRED tenía localizada su cámara de video para monitorear en forma visual al volcán Televisa, como apoyo a las labores del CENAPRED, tuvo la amabilidad de prestar una caseta óptima para este monitoreo.

Se trata de una caseta de 16 m², con un ángulo perfecto para observar al volcán y línea de vista al CENAPRED. En su azotea se localiza la antena de microondas con la que se transmite la imagen de video del volcán al CENAPRED.

Este lugar fue el ideal ya que la cámara quedaría en un lugar seguro, con muy buena vista del volcán y con suministro de energía eléctrica. Además, se tiene la *imagen visible de video* con la que se puede cotejar la imagen térmica, ya que como se estableció en los resultados preliminares, es importante tener una imagen de referencia para poder entender e interpretar las termografías.

3.3 Esquema del monitoreo

El esquema que se propone es el de tener un lugar para captar imágenes térmicas del volcán, pudiendo observar y manipular remotamente la cámara desde el centro de monitoreo volcánico en CENAPRED. El lugar para colocar la cámara quedó determinado en el Cerro de Altzomoni, como se expuso anteriormente.

Resulta necesario establecer un medio de comunicación que permita controlar la cámara de forma remota, observar las imágenes térmicas en tiempo real (*cuando esto sea necesario*), y poder transferir los archivos de las imágenes para tener registro de ellas en el CENAPRED. Se requiere para ello de un canal de comunicación bi-direccional entre los dos puntos, mismos que están separados a una distancia de 58.8 km.

Se podría hablar, entonces, de una estación local, en CENAPRED, y una estación remota, en Altzomoni.

Al considerar la forma de comunicación que se tendría, es necesario partir de la periodicidad con que se presentan los fenómenos naturales a monitorear.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

En la Tabla 3.1, se presentan los fenómenos y el orden de magnitud con que suceden.

Fenómeno natural a monitorear	Orden de magnitud
Fumarola	Unidades a decenas de metros sobre segundo
Anomalía en laderas y/o glaciar	Días en aparecer
Flujo piroclástico	Centenas de metros sobre segundo
Flujo de lava	Unidades de metros por día

Tabla 3.1 Fenómenos naturales a monitorear con periodicidad

La captura de la imagen térmica se realiza en 0.8 segundos. La velocidad máxima que un fenómeno pudiera tener para que sea propiamente capturado (los objetos sean muestreados una sola vez por imagen) está en función de la distancia a que se presenta. Considerando que éste sucede a 11 km (distancia horizontal de Alzomoni al centro del cráter), el rectángulo que representa cada pixel capturado es de 22 x 26.4 m. Si el fenómeno se desplazara horizontalmente, tendría la posibilidad de recorrer 22 m en 0.8 s para que permaneciera en el mismo pixel, por lo que su velocidad máxima será el cociente de estas dos cantidades: 27.5 m/s. Si el fenómeno se desplazara verticalmente, tendría la posibilidad de recorrer 26.4 m en 0.8 s, por lo que su velocidad máxima sería 33 m/s. Dado que los fenómenos mencionados raramente se desplazan de forma horizontal o vertical, la velocidad máxima que un fenómeno pudiera tener sería la menor, de 26 m/s.

Evidentemente, la velocidad con que se desplazan los flujos piroclásticos es significativamente mayor a las demás, sin embargo se presentaría este fenómeno solo si existiese una erupción mayor, por lo que consideraremos a las fumarolas como el fenómeno de mayor velocidad a capturar. Tomando en cuenta que la velocidad de una fumarola típica fue de 13 m/s²⁷, y el tiempo de captura del detector, se cumple con las condiciones establecidas.

En la elección del tipo de comunicación se tomará en cuenta esta velocidad de captura para que, en lo posible, se obtenga el monitoreo en tiempo real.

Este tipo de comunicación tendrá que ser forzosamente inalámbrica ya que, aunque la estación local se encuentre en área metropolitana, la estación remota se encuentra en área rural, montañosa y con difícil acceso, por lo que sería muy difícil y costoso optar por una solución por cable.

Teniendo un enlace punto a punto entre los dos lugares, se puede colocar una computadora en cada uno de éstos y así, a través de ellas, poder tener control de la cámara. Este esquema propuesto tiene la ventaja de poseer capacidad de expansión para utilizarlo no

²⁷ Comunicación personal con Dr. Servando de la Cruz-Reyna

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

sólo para el monitoreo térmico, sino que, a partir de la computadora personal, se podrían implementar en un futuro otras formas de monitoreo, adquisición de datos o control de dispositivos en forma remota.

A continuación se muestra, en la Figura 3.2, el esquema del monitoreo propuesto.

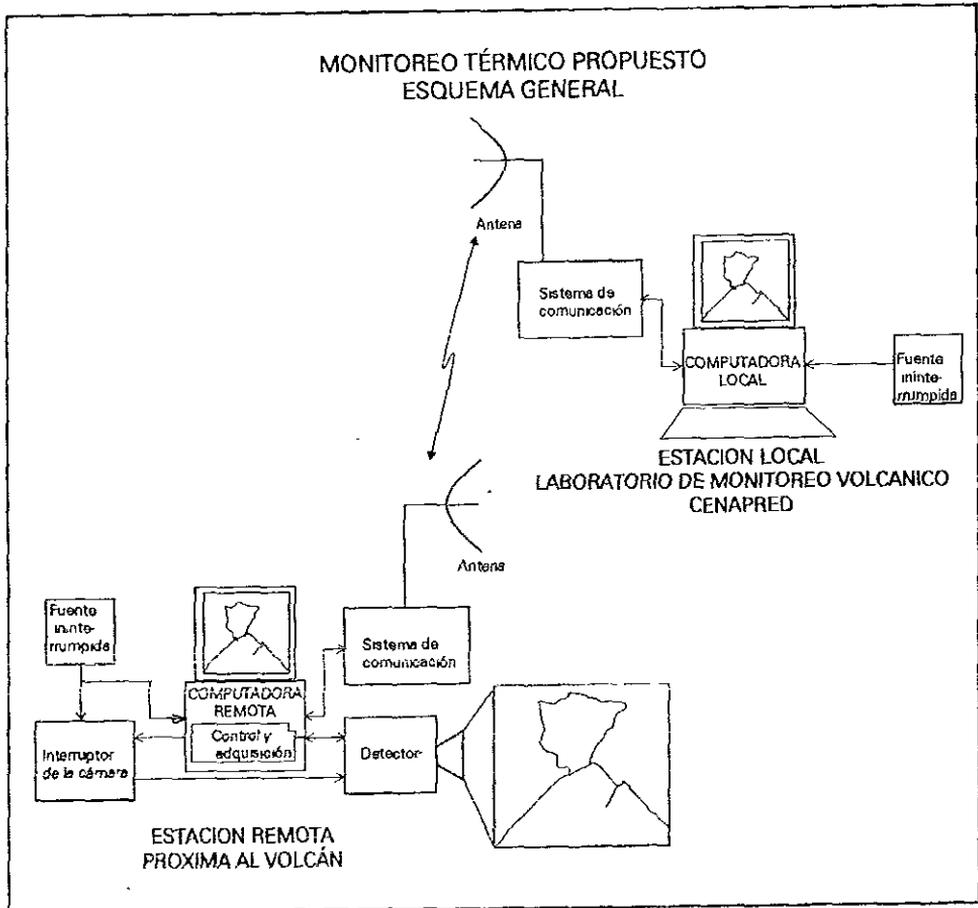


Figura 3.2 Esquema de monitoreo propuesto, con sus dos estaciones: la del cerro Alizomoni a 11 km del volcán, y la del centro de monitoreo volcánico en CENAPRED.

3.4 Implementación del sistema de monitoreo térmico

3.4.1 Acondicionamiento de la estación remota

3.4.1.1 Modificaciones a la caseta

Quedó establecido, en el diseño del monitoreo térmico, el lugar en el que se colocaría la cámara térmica. Este sería en la caseta cedida por la empresa Televisa, en el cerro Altzomoni. Como se describió anteriormente, esta caseta estaba en desuso y requería adaptarse para poder colocar el equipo térmico. En la Foto 3.1, se presenta una vista aérea, de las instalaciones en Altzomoni

Las modificaciones que se hicieron a la caseta, todas ellas de forma permanente, se efectuaron con el objeto de aprovechar esta instalación no solo para implementar el monitoreo térmico, sino también para futuras expansiones de diferentes sistemas de monitoreo. En la Foto 3.2 se tiene una vista exterior de la caseta, mientras que en la Foto 3.3, se aprecian las tres ventanas, que fueron abiertas, con orientación hacia el volcán.

Se abasteció la caseta de energía eléctrica, alimentándose de la toma de la subestación eléctrica del edificio de Televisa. Se colocaron dos pastillas térmicas de 10 A cada una, de forma de tener protegido el equipo contra eventuales descargas eléctricas. Una de estas pastillas fue requerida, independientemente, por el equipo de transmisión utilizado, del cual se hablará posteriormente. Se creó una instalación de tierra, poniendo tres varillas de 1.5 m cada una, en el lado Este de la caseta, así como su cable independiente conectado a una barra de tierra (barra de cobre) localizada en el interior. Aunque las condiciones del terreno no favorecieron un valor bajo de resistencia, la compañía Televisa cuenta, con un sistema pararrayos en su edificio principal y una regulación de corriente eléctrica para todas sus instalaciones, incluyendo esta caseta.

El recinto no contaba con ventanas ni puerta. Se instaló la puerta con dos cerraduras, por seguridad del equipo y para poder tener controlada la entrada a la caseta. Se requirió también abrir ventanas con vista al volcán, para poderlo monitorear desde dentro. Se abrieron tres ventanas una para el monitoreo térmico, otra para la cámara visual y una tercera para poder observar al volcán desde dentro de la caseta.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

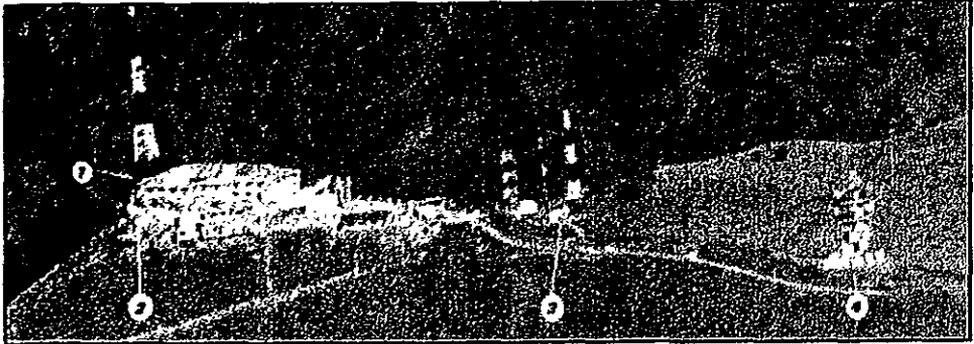


Foto 3.1 Cerro de Alzomoni: 1. Edificio y antena de Televisa, 2. Caseta cedida a CENAPRED por Televisa, 3. Caseta de CENAPRED (PPA/IIA), 4. Repetidora de Telmex.



Foto 3.2 y Foto 3.3 Vista exterior e interior de la nueva caseta en cerro de Alzomoni

Foto 3.4 Primera imagen del volcán obtenida desde la nueva caseta y recibida en CENAPRED.



3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

La cámara de video fue trasladada a este local, para separar el equipo de monitoreo de las instalaciones de Televisa y poder así tenerlo en un sólo lugar. En la Foto 3.4 se presenta la primer imagen capturada por la cámara de video desde la nueva caseta.

Con un termómetro de temperaturas máximas y mínimas, se midieron las temperaturas extremas dentro del local, siendo la mínima de 0 °C y la máxima de 14 °C. Estas temperaturas entran dentro del rango de funcionalidad de todos los equipos que se planean emplear, por lo que no fue necesario implementar un acondicionamiento ambiental.

Se colocó un equipo de regulación para prevenir eventuales descargas eléctricas y un equipo de respaldo de energía eléctrica, para tener en la medida de lo posible, un sistema ininterrumpido de energía. Cabe mencionar que el edificio de Televisa cuenta ya con este servicio, ya que existe un generador de electricidad que entra en funcionamiento con la eventual suspensión de la alimentación de la energía eléctrica.

Finalmente, se colocó una mesa en la que se instalaría el equipo de monitoreo térmico.

La Foto 3.6 presenta las opciones para ubicar la cámara térmica con sus altitudes y su distancia al volcán. En la Foto 3.7 se tiene una vista aérea del volcán y del cerro de Alzomoni. En la Foto 3.8, se presenta una brigada de monitoreo en el cerro de Alzomoni.

En el Apéndice C se presenta el plano general de la nueva caseta cedida a CENAPRED por Televisa.

3.4.1.2 Ventana para la cámara térmica

La ventana para el monitoreo térmico requiere futuras adaptaciones. Esto se debe a que el vidrio no es transparente al infrarrojo, por ello, si la cámara se coloca frente a éste, bloquearía las radiaciones y el detector no captaría temperaturas reales. Se requiere la colocación de una ventana especial, para dejar pasar por la ventana las ondas dentro del ancho de banda que detecta la cámara (de 3 a 5.3 μm).

Los mejores materiales que cubren esta necesidad, son el Zafiro y el Seleniuro de Zinc, ZnSe. Comercialmente, estas ventanas existen, pero de dimensiones máximas de 5 cm de diámetro. A continuación, en la Figura 3.3 y Figura 3.4, se presentan las gráficas de transmitancia de estos dos materiales.²⁸

²⁸ Datos obtenidos del catálogos de Meiles Griot 1997-98. Esta compañía y Optosigma venden de forma comercial estas ventanas. Ambas compañías son distribuidas en México por "Calipo" (Calipo. Gutenberg #34-2, Col. Anzures, México D.F. Tel. 260-40-93 y 260-50-94)

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

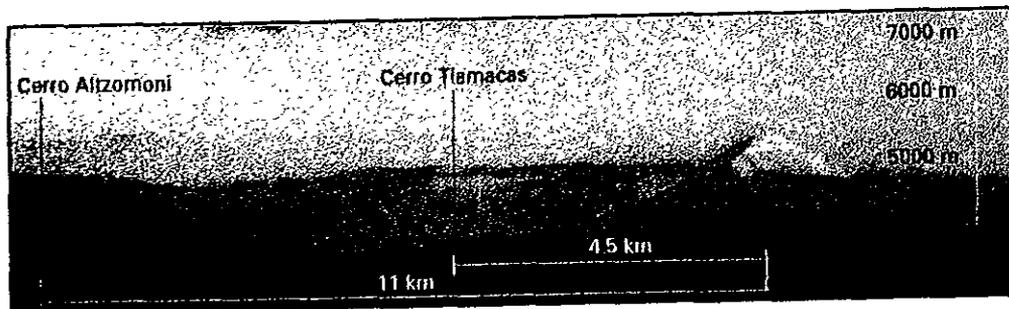
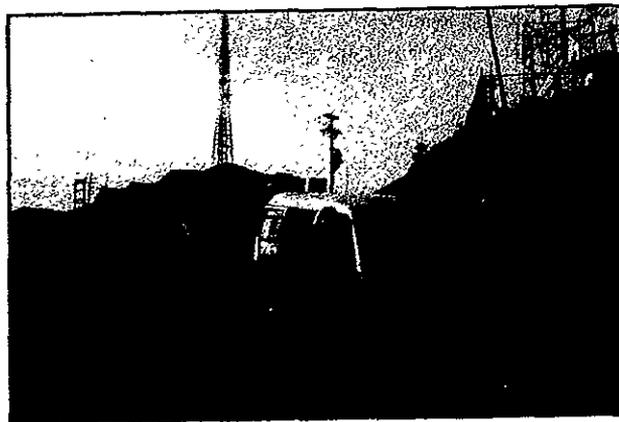


Foto 3.5 Ubicación de las dos opciones para la instalación del equipo térmico



Foto 3.6 Vista aérea del volcán y del cerro de Alizomoni

Foto 3.7 Brigada de monitoreo volcánico en el cerro de Alizomoni



3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

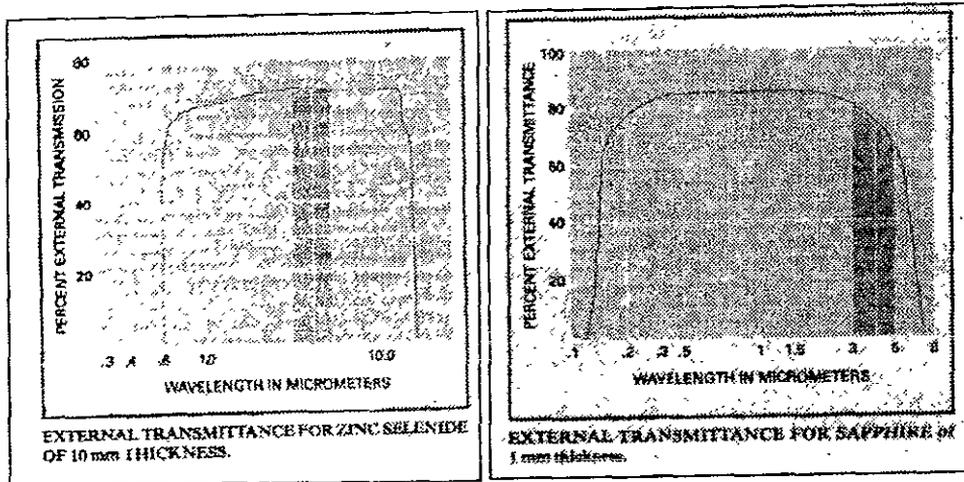


Figura 3.3 y Figura 3.4 Diagramas de transmitancia de las ventanas de ZnSe (zq.) y del Zafiro (der.) Se puede apreciar la banda de 3 a 5.3 μm en ambos diagramas.

Se procedió entonces a establecer las dimensiones mínimas requeridas para esta ventana. Se decidió dejar un centímetro de distancia entre el lente y la ventana, ya que de estar pegados, podría haber condensación, lo que distorsionaría la imagen. Dada la apertura del detector, se obtuvo que era suficiente con tener una ventana de 6 x 7 cm. Sin embargo no existe comercialmente una ventana de estas dimensiones. El fabricante se encuentra analizando el caso y se espera tener respuesta a la brevedad.

Como solución temporal, se decidió hacer pruebas de transmitancia con distintos materiales, para poder implementar el monitoreo, sin necesidad de esperar la respuesta del fabricante.

Se pudo observar que para diferentes tipos de plásticos, la respuesta del equipo variaba; sin embargo, se encontró un plástico delgado, que no alteraba de manera considerable la temperatura del cuerpo en medición (no lineal; entre 0 y 3°C).

Las mediciones, mientras no se consiga el material especial, podrán estar afectadas en estos rangos de temperatura, sin embargo, la diferencia de temperatura entre imágenes mostrará efectivamente si hay o no incremento en el estado del objeto en estudio. Se decidió, en forma temporal, emplear este plástico como ventana.

3.4.2 Adquisición de la imagen

3.4.2.1 La comunicación con el sensor

De manera de poder capturar y procesar la imagen en forma remota, a través de algún dispositivo (unidad de control, computadora, etc.), se estudió la forma de comunicación con el sensor. Físicamente, la comunicación con el detector se hace a través de un conector DB-25. El protocolo de comunicación no resulta evidente, ya que la información de la imagen se transmite de forma analógica, y el resto de los pines se emplean para el control y la alimentación de la unidad detectora. Se trató de establecer comunicación con el fabricante, explicando el empleo que se requería dar al equipo. Sin embargo, el fabricante se negó a dar información ya que cualquier información técnica está protegida por sus patentes, y es contra la ley modificar de alguna forma su diseño.

3.4.2.2 Opción del fabricante.

El fabricante del equipo (NEC San-ei Instruments, Ltd) ofrece una tarjeta de computadora (TH41-315) que funciona como interfase con el detector (TH31-04MR), eliminando el uso de la Unidad de Control. Esta opción resultó muy conveniente, ya que directamente la información se recibe en una computadora personal, pudiendo tener todo el control, almacenamiento y proceso de los datos generados, a través de un programa especializado (TH31-702), desde la misma computadora. El funcionamiento de este software se describe en el Apéndice B.

3.4.2.3 Alternativa de solución

A falta de información técnica sobre la comunicación entre el detector y la unidad de control, y tomando en cuenta lo apremiante que resultaba el implementar nuevas formas de monitoreo del volcán, se decidió recurrir a la opción dada por el fabricante. Esta opción permite la comunicación directa con la computadora sin necesidad de crear o adquirir una interfase intermedia. La computadora no sólo se emplea para obtener las imágenes térmicas, sino que se tiene con ella un control total del equipo térmico. Una ventaja de esta opción es el despliegue sin superponer imágenes. Al seleccionarse este modo de operación, la imagen observada no es la suma de imágenes anteriores, como lo hace la unidad de control, sino que se despliega una imagen nueva cada 0.8 segundos. Al no sumar las imágenes, la temperatura de un evento es la que se capta realmente, y no la suma de lo que captó en varias imágenes, lo cual alteraría la información cuando el evento captado variara rápidamente.

Además, de esta forma se pueden generar animaciones de las imágenes térmicas ya que el software de captura permite obtener sucesiones de imágenes.

3.4.3 Control de la estación remota

3.4.3.1 Control de la computadora remota

Para tener control a distancia de la cámara infrarroja, era necesario poder ejecutar el software de captura desde la computadora local (CENAPRED), captando la información que llegara a la computadora remota (Alzomoni), que es en donde se conectaría el equipo. Sin embargo, este software (TH31-702) no cuenta con capacidades de ejecutarse a través de un enlace, y por lo tanto el programa debe correrse en la computadora remota donde el equipo sea conectado.

3.4.3.1.1 Software utilizado

Como se deseaba tener control total del programa de adquisición en la computadora local y poder transferir los archivos generados por el equipo térmico, se optó por emplear un programa de emulación de terminal remota

Estos programas emulan en una computadora local, todo lo que pasa en la computadora lejana. Es decir que tanto el teclado como la pantalla de la computadora local funcionan como el teclado y la pantalla de la otra, pudiendo apreciar todo lo que pasa en la terminal remota. Estos programas pueden, además, transferir archivos entre las dos máquinas, de forma comprimida. La comunicación entre las dos máquinas, puede establecerse por distintos medios, como: serial RS-232 modem o null modem, paralelo, red, etc.

Para probar el desempeño de los programas de emulación de terminal remota, se empleó, primeramente y de forma cualitativa, un enlace Ethernet 10BaseT (10 Mbps) entre los dos equipos que contendrían los programas.

Para la selección del software de emulación de terminal remota fue necesario tomar en cuenta su interacción con el software de captura. Los diferentes programas se evaluaron desde tres puntos: actualización de imagen, velocidad de respuesta y velocidad de transmisión de archivos.

Se estudiaron como posibilidad los programas comerciales de emulación de terminal remota: "Carbon Copy ver. 4.0" de Microcom y "PC AnyWhere ver. 7.5" de Symantec Corp. Ambos paquetes tienen aproximadamente el mismo precio (\$150 DLS) y corren en un ambiente de Windows 95. A continuación se explican los puntos de evaluación y su resultado en cada uno de ellos

Se observó que para la actualización de pantalla, el software transmite segmentos de ésta cada determinado tiempo. Si la velocidad de transmisión es muy baja, la actualización

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

también lo será, la imagen recibida (en tiempo real) estará compuesta por una serie de segmentos de imágenes no capturadas al mismo tiempo, por lo que la imagen resultante es ficticia. Sin embargo, esto depende de la velocidad del enlace, tema que se hablará más tarde.

Aunque no se actualice la terminal local a la velocidad que sucede el evento, la computadora remota puede capturar cada imagen en 0.8 s y luego transmitir las. Sin embargo, el monitoreo térmico en tiempo real requiere de la mayor velocidad de transmisión y de eficiencia del software para que sea lo más real posible.

Es por eso que el programa emulador de terminal remota tiene que estar actualizando tan rápido como su algoritmo de captura le permita. Empleando una velocidad base de 28.8 kbps para pruebas de tiempo de actualización, el paquete PC AnyWhere actualizó la pantalla en 26 segundos, mientras que el programa Carbon Copy, empleó 30 segundos para lograrlo.

Al tiempo de respuesta que tuvo el paquete al accionar una función en la computadora local y que se empezara a ejecutar en la remota le llamamos "tiempo de respuesta". Para el caso de Carbon Copy, mientras se reciben datos, el usuario no puede accionar algún comando. Para hacerlo, se debe esperar cierto tiempo (mayor al de actualización de pantalla) sin que la imagen cambie, antes de poder actuar sobre la computadora remota. Esta característica no es deseable en el sistema de monitoreo propuesto ya que entorpecería todas las acciones.

Por otro lado, el programa PC AnyWhere, permite que aunque la imagen no esté actualizada en su totalidad, el usuario local puede accionar una función en la remota. El tiempo de respuesta máximo fue de 3 seg para velocidades de 2400 bps y prácticamente inmediato (menor a 1 s) para velocidades superiores a los 14 400 bps.

Esta capacidad del software permite que en caso que exista un evento en donde se quiera capturar la imagen actual, no sea necesario esperar a que la pantalla esté actualizada. Para la evaluación del tiempo de respuesta, el paquete PC AnyWhere tuvo mucho mejor resultado que el Carbon Copy.

Otra característica adicional que el PC AnyWhere presentó fue que este software no alteraba, como lo hacía Carbon Copy, el funcionamiento de la computadora remota, pudiendo continuar su proceso como lo haría sin estar controlada por algún programa.

Ambos paquetes tienen la opción de transferencia de archivos de manera comprimida. Tanto Carbon Copy como PC AnyWhere tomaron el mismo tiempo en la transmisión de archivos para una velocidad de transmisión dada.

El software de emulación de terminal remota elegido fue el PC AnyWhere ver. 7.5 ya que satisfizo los criterios de evaluación.

3.4.3.1.2 Monitoreo periódico y continuo

Se requería que se pudiera efectuar el monitoreo en dos modalidades: de forma periódica y de forma continua.

La forma periódica, permitiría llevar un control periódico de las temperaturas, principalmente del edificio volcánico. Siendo que los cambios térmicos en las laderas aparecerían paulatinamente, basta con tomar una imagen cada hora o cada intervalo de tiempo deseado.

La forma continua permitiría que el personal de guardia, o en un futuro un sistema automático conectado al sistema de alarmas, active un programa alterno. Esta modalidad consistiría en grabar una sucesión de imágenes, con un tiempo intermedio entre cada una de ellas (el tiempo podría ser modificable).

El monitoreo continuo no necesariamente tendría que ser grabado, simplemente se podría observar el comportamiento térmico del volcán en tiempo real, y en el caso que existiese un evento, o simplemente se quisiera adquirir la imagen actual, bastaría con capturarla y trasladar el archivo original al centro de monitoreo. Para el caso que se deseara capturar la sucesión de imágenes, se evocaría a otro programa que programe al software de adquisición y empiece su captura continua, mientras en pantalla se podría ver en tiempo real. Una vez terminado el evento, se podrían transferir y analizar los datos obtenidos en la computadora local.

Para poder automatizar el proceso de monitoreo, se requiere primero la posibilidad de prender y apagar a distancia la cámara detectora; y segundo, de un programa que organice y active de manera automática el proceso de captura, como si lo hiciera el usuario.

3.4.3.1.3 Encendido del detector

Para alargar la vida útil del detector, se decidió que no era conveniente tener el equipo encendido en forma continua. Se debía tener un interruptor que se controlara a distancia. Para ello, se implementó un sencillo diseño de interruptor, controlado por la computadora por medio del puerto serie, cuyo diagrama se muestra en la Figura 3.5.

Se empleó el puerto serie de la computadora para la salida de una palabra. Esta palabra binaria, activa un monoestable que limpia la señal y activa un flip-flop (FF) de tipo "toggle". Así, el FF cambia de estado, encendiendo o apagando el "gate" de un TRIAC, aislado del FF por un opto acoplador. El TRIAC, funciona como lo haría un relevador, sin embargo, la vida útil de un TRIAC es mucho mayor, ya que no tiene un desgaste mecánico.

Los circuitos integrados empleados son de fabricación comercial.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

programa de captura, abra el canal de adquisición, emplee el enfoque automático para ajustar los niveles de temperatura y sensibilidad, guarde la imagen, cierre el canal, apague el detector y cierre el programa de captura. A este programa se le llamó "Captura Periódica" y el nombre de la imagen capturada tiene el formato "mes+día+hora+minuto.SIF".

Para realizar funciones en un programa, es necesario activarlas por medio del teclado, es decir mandarle instrucciones como si se utilizara el teclado. En los programas realizados, se incluyó un retraso entre cada envío de tecla de 250 ms para seguridad en la selección de funciones.

En la Tabla 3.2 se presenta exclusivamente el listado para realizar la rutina de "Captura Periódica" y en la Tabla 3.3, su explicación, en donde se describe; cada acción (función final realizada), los comandos empleados (instrucciones al Launch Pad necesarios para lograr la función deseada), y el retraso (tiempos aproximados de realización) cuando éstos sean significativos.

La segunda rutina, sería el activado en caso de un evento de interés que amente capturarla continuamente. La rutina prendería la cámara, programaría el software de captura para que tome una sucesión de imágenes durante 10 minutos, cada imagen espaciada por 10 segundos (60 imágenes) y grabada en el momento. Una vez terminada esta secuencia, tanto el programa como la cámara continuarían en funcionamiento por, si se quisiese seguir observando, en tiempo real, al volcán. A este programa se le llamó "Captura Continua". A continuación, en la Tabla 3.4, se presenta el listado correspondiente y en la Tabla 3.5, la rutina con descripción de comandos.

En el Apéndice D se presenta una guía de referencia del programa "Launch Pad" en lo que concierne al cambio de parámetros utilizados.

```
{Activate "TH3100 Data
Capture"}%FOCI{DELAY
3000}~^{F6}{TAB 9}~{DELAY
7000}{TAB 8}{DELAY
1000}~{DELAY
500}{TAB}{TAB}{TAB}{DELAY
500}{TAB}{TAB}~{DELAY
1000}{TAB 2}{DELAY
1000}{DELETE
1}{Month}{Day}{Hour}{Minute}{TA
B 6}~%y{TAB 1}~%FC^X%Y
```

Tabla 3.2 Listado de "Captura Periódica"

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

Función empleada	Comandos utilizados	Descripción	Retraso
Cargar el Programa TH3100 Data Capture	Action: run program	Corre el programa capturador de imágenes IR.	20 s
Activa la ventana del TH3100 Data Capture	{Activata "TH3100 Data Capture"}	Pone como ventana activa en Windows, al programa de captura.	-
Abre el canal 1 para capturar la imagen	%F	Abre el menú "File"	
	O	Selecciona la opción "Open"	
	C	Indica el programa que capture	
	1	Elige en canal 1	
	{DELAY 3000}~	Crea un retraso para esperar que la imagen sea adquirida.	3 s
Cambia de pantalla al menú de comandos	^ {F6}	El menú de comandos del programa de captura es activado.	
Ajusta los niveles y sensibilidad (FULL AUTO)	{TAB 9}	Manda 9 tabulaciones para colocarse en la tecla correspondiente	
	{ENTER} o ~	Valida la elección	
	{DELAY 7000}	Crea un retraso para esperar que realice la función	7 s
Congela la imagen (FREEZE)	{TAB 8}	Manda 8 tabulaciones para colocarse en la función Freeze, para congelar la imagen.	
	{DELAY 1000}	Crea un retraso de ajuste.	1 s
	{ENTER}	Valida la elección	
	{DELAY 500}	Crea un retraso para esperar que realice la función	0.5 s
Graba la imagen (SAVE)	{TAB 5}	Manda 5 tabulaciones para colocarse en la tecla correspondiente: SAVE	
	{ENTER}	Valida la elección	
	{DELAY 1000}	Crea un retraso para esperar que realice la función	1 s
Pone nombre al archivo MES+DIA+HORA+MIN.	{TAB 2}	Manda 2 tabulaciones para colocarse en el campo de nombre	
	{DELETE 1}	Borra lo que está escrito por default: un *	
	{Month}	Escribe el mes	
	{Day}	Escribe el día	
	{Hour}	Escribe la hora	
	{Minute}	Escribe el minuto	
	{TAB 6}	Selecciona la opción "OK"	
	{ENTER}	Valida la elección	
%Y	En el caso de existir archivo, lo sobrescribe.		
Selecciona 1 página	{TAB 1}	Se posiciona en la opción	
	{ENTER}	Valida la elección	
Cierra el canal	%F	Elige el menú de "File"	
	C	Cierra el canal	
Cierra programa	^X	Cierra programa	
	%Y	Valida la elección "YES"	
Tiempo por envío de teclas		Cada tecla es enviada con un retraso de 250 ms. 55 teclasx 250ms = aprox 14 s	14 s
Tiempo de captura		El tiempo que tarda el programa en capturar la imagen	40 s
Tiempo total		El tiempo total de todo el proceso: desde activar el programa, hasta cerrarlo.	46.5 s

Tabla 3.3 Rutina empleado para grabar una imagen térmica, "Captura Periódica"

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

```
{Activate "TH3100 Data
Capture"}%FOC1{DELAY
1000}~^ {F6}{TAB 9}~{DELAY
7000}{TAB 2}~{DELAY 1000}{TAB
2}~{TAB 1}~{TAB 3}~{TAB
2}{DELETE
1}{Month}{Day}{Hour}{Minute}{TAB
6}~%y{TAB 2}{TAB 3}{DELETE
1}4~{TAB 2}{DELETE 2}10~{TAB 3}
{TAB 1}{DOWN}{TAB 15}{DELAY
1000}{DELETE 4}60~{TAB 4}{TAB
1}~%y{TAB 6}~%y
```

Tabla 3.4 Listado de "Captura Continua"

Función empleada	Comandos utilizados	Descripción	Retraso
Cargar el Programa TH3100 Data Capture	Acción: run program	Corre el programa capturador de imágenes IR.	20 s
Activa la ventana del TH3100 Data Capture	{Activate "TH3100 Data Capture"}	Pone como ventana activa en Windows, al programa de captura.	-
Abre el canal 1 para capturar la imagen	%F	Abre el menú "File"	
	O	Selecciona la opción "Open"	
	C	Indica al programa que capture	
	1	Elige en canal 1	
	{DELAY 3000}~	Crea un retraso para esperar que la imagen sea adquirida.	3 s
Cambia de pantalla al menú de comandos	^ {F6}	El menú de comandos del programa de captura es activado.	
Ajusta los niveles y sensibilidad (FULL AUTO)	{TAB 9}	Manda 9 tabulaciones para colocarse en la tecla correspondiente	
	{ENTER} o --	Valida la elección	
	{DELAY 7000}	Crea un retraso para esperar que realice la función	7 s
Selecciona el modo RUN	{TAB 2}	Manda 2 tabulaciones para colocarse en la tecla correspondiente: RUN	
	{ENTER}	Valida la elección	
	{DELAY 1000}	Crea un retraso para esperar que realice la función	1 s
Limpia antiguas configuraciones)	{TAB 2}	Manda 2 tabulaciones para colocarse en la tecla: CLEAR	
	{ENTER}	Valida la elección	
Vuelve a seleccionar el modo RUN	{TAB 1}	Manda 1 tabulación para volver a entrar al modo: RUN	
	{ENTER}	Valida la elección	
Selecciona la opción de grabar	{TAB 3}	Manda 3 tabulaciones para colocarse en la tecla: SAVE	
	{ENTER}	Valida la elección	
Pone nombre al archivo MES+DIA+HORA+MIN.	{TAB 2}	Manda 2 tabulaciones para colocarse en el campo de nombre	
	{DELETE 1}	Borra lo que esté escrito por default: un *	
	{Month}	Escribe el mes	
	{Day}	Escribe el día	
	{Hour}	Escribe la hora	

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

	{Minute}	Escribe el minuto	
	{TAB 6}	Selecciona la opción "OK"	
	{ENTER}	Valida la elección	
	%Y	Opción de sobrescribir	
Selecciona opción de tiempo inicial	{TAB 2}	Manda 2 tabulaciones para colocarse en la opción: "Initial Time"	
		Manda un espacio para validar la caja de elección	
Elige la última página: 4	{TAB 3}	Manda 3 tabulaciones para colocarse en: "Page"	
	{DELETE 1}	Borra la opción preestablecida "4"	
	4	Elige una nueva opción	
	{ENTER}	Valida la elección	
Elige el tiempo de periodicidad: 10 seg.	{TAB 2}	Manda 2 tabulaciones para colocarse en la tecla correspondiente	
	{DELETE 2}	Borra la opción preestablecida	
	10	Elige 10 segundos	
	{ENTER}	Valida la elección	
Selecciona la opción de congelarse al terminar:	{TAB 1}	Manda 1 tabulación para colocarse en la opción "Freeze after Meas. Completed"	
		Manda un espacio para validar la caja de elección	
	{TAB 1}	Manda 1 tabulación para colocarse en la opción: "Set Meas. Page Num."	
	{DOWN}	Con las flechas de posicionamiento hace la elección	
Opción para Grabar	{TAB 2}	Manda 2 tabulaciones para colocarse en la tecla correspondiente	
Elige cantidad de páginas	{TAB 15}	Manda 15 tabulaciones para colocarse en la opción: "Max. Page"	
	{DELAY 1000}	Crea un retraso para esperar que realice la función	1 s
	{DELETE 4}	Borra opción predeterminada	
	60	Selecciona 60 páginas	
	{ENTER}	Valida la elección	
Fin de la programación del modo al confirmar el grabado	{TAB 4}	Manda 4 tabulaciones para colocarse en la tecla correspondiente	
		Manda un espacio para validar la caja de elección	
Activa la captura	{TAB 1}	Manda 1 tabulación para colocarse en la tecla determinada.	
	{ENTER}	Valida la elección	
	%Y	Elige la opción YES para sobrescribir el archivo	
	{TAB 1}	Manda 1 tabulación para colocarse en la opción "OK"	
	%Y	Sobrescribe el archivo	
Tiempo para empezar la captura		Este tiempo ya incluye el retardo por el envío de teclas. El tiempo sin teclas es de 32 s	41 s

Tabla 3.5 Programa empleado para grabar una sucesión de imágenes térmicas cada 10 segundos por 10 minutos, "Captura Continua"

3.4.4 Enlace

3.4.4.1 Requerimientos de la comunicación

Una vez establecido el software a emplear, resultó conveniente hacer pruebas para establecer qué velocidad de enlace es la que se requiere como mínimo. En el Esquema de Monitoreo, se analizaron las velocidades con que se presentan los fenómenos a monitorear.

Las rutinas de "Captura Periódica" y "Captura Continua" permiten obtener las imágenes que fueron capturadas a una velocidad de 0.8 segundos por cada imagen, tiempo suficiente para capturar al fenómeno de mayor velocidad (las fumarolas). Si estas rutinas fueran la única manera de monitorear, la velocidad del enlace estaría limitada al tiempo en que se desearía recibir una imagen. No sería necesario que la actualización de pantalla se realizara con bastante rapidez ya que las imágenes reales se transmitirían a la estación local una vez acabado el proceso. Por el otro lado, si la transmisión fuera demasiado lenta, no se cumpliría el requisito de monitorear el volcán en semi tiempo real, por lo que hubo la necesidad de establecer un tiempo mínimo para la actualización de la pantalla remota en la local, este tiempo fue tomado en base al desplazamiento que presentan las fumarolas, dicho tiempo fue de 30 segundos.

Para probar esta velocidad de transmisión, se empleó un enlace punto a punto a base de modems. Se hicieron pruebas de comunicación y simulación de monitoreo a diferentes velocidades. Se tomó el tiempo que tardaba, una vez modificada la imagen de la estación remota, en aparecer en la computadora local. Dicho tiempo se llamó tiempo de actualización; al tiempo en el que transfería el archivo de una imagen térmica, de la computadora remota al CENAPRED, se llamó tiempo de transferencia (todas las imágenes térmicas en el formato del dispositivo tienen el mismo tamaño de 138 KB). En la Tabla 3.6 se muestran los resultados de estas pruebas:

Velocidad (bps)	Tiempo de actualización (seg.)	Tiempo de transferencia (seg.)
2,400	250	357
4,800	120	171
9,600	55	86
14,400	30	40

Tabla 3.6 Tiempo de actualización de pantalla y de transferencia de archivos para distintas velocidades de transmisión

A partir de estas pruebas, se estableció que para tener un monitoreo de forma semi tiempo real, en menos de 30 segundos una pantalla actualizada, se requería de una velocidad de más de 14,400 bps.

La imagen recibida en la estación local es, en sí, una mezcla de los eventos ocurridos durante el tiempo de actualización ya que el software, manda franjas de la figura capturada, a

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

medida que la velocidad de transmisión es mayor, mayor será la franja que se transmite y menor será la distorsión en la imagen local. Tomando en cuenta que gran parte de la imagen permanecerá constante, la actualización de la fumarola en la estación remota no será gravemente afectada.

Para el caso del monitoreo de anomalías en laderas y glaciár, el tiempo en que ocurre la variación de temperaturas es mucho menor al de actualización, por lo que no se tendrán problemas en cuanto a la actualización de pantalla. Aunque el evento fuera sumamente veloz, inclusive flujos piroclásticos, se captaría la temperatura de estos aunque no con exactitud su posición, por el problema descrito en el Esquema de Monitoreo Térmico. El flujo piroclástico daría la apariencia de una zona con gran temperatura que, quizás en la siguiente imagen ya no se encuentre.

Para el tiempo de transferencia, la imagen no es afectada ya que se envía el archivo de una imagen grabada. Sin embargo, es recomendable que esto no sea demasiado tardado ya que entorpecería el proceso de análisis - decisión.

De esta forma, quedó establecido que para el sistema propuesto, se requería tener una comunicación superior o igual a 14,400 bps.

3.4.4.2 Formas de comunicación inalámbrica

Como se vio en el diseño del monitoreo, en este caso es necesario tener una comunicación inalámbrica.

Al hablar de comunicación de datos, es común pensar en comunicaciones alámbricas. A pesar del gran y diverso uso de las comunicaciones cableadas, las comunicaciones inalámbricas son también muy comunes. Canales inalámbricos se emplean para comunicaciones digitales cuando no es costeable crear un enlace entre dos puntos por medio de cable.²⁹

Existe una diferencia física entre una comunicación inalámbrica y una alámbrica, que sale de la pregunta siguiente: ¿En una comunicación inalámbrica, quién toma el papel del cable?

Existen diferentes métodos para establecer enlaces inalámbricos entre dos puntos. Los más comunes son el de transmisión infrarroja y el de radio frecuencia. Los métodos infrarrojos y de radio frecuencia difieren en la longitud de onda en el espectro electromagnético que emplean para transmitir. El espectro electromagnético (Figura 2.1) es el rango conocido de longitudes de onda emitidas por la materia. Las ondas de radio son las de mayor longitud de

²⁹ CARDENTE, John. *EE535 Project: Wireless Transmission*.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

onda, medidas en metros. Los rayos gamma son las más pequeñas, medidas en cientos de nanómetros.

Al contrario de las ondas de radio frecuencia, las longitudes de onda infrarrojas no son capaces de atravesar muros. Esta característica tiene sus ventajas y desventajas. Una ventaja es que por no atravesar muros, lo que se transmite en un recinto queda en ese recinto, por lo que es una transmisión segura. Además de la certidumbre de la información durante una transmisión infrarroja, ésta es inmune a las frecuencias de interferencia electromagnéticas y de radio. Una desventaja es la pérdida de la señal por obstáculos que pueden ser personas, muros, etc. El infrarrojo tiene una longitud de onda en el espectro electromagnético, entre la luz visible y las microondas.

A continuación se mencionan algunos tipos de comunicación inalámbricas.

3.4.4.2.1 Microondas

Los enlaces de microondas son un método de transmisión de datos que utiliza ondas de radio de alta frecuencia. Requieren una línea de vista (LOS) entre las estaciones. Se compone de tres elementos primarios: dos estaciones, con un receptor y un transmisor en cada una, y un canal que es el aire. Los enlaces por microondas pueden ser usados en ambientes tanto rurales como urbanos. Las microondas se ven afectadas por las condiciones ambientales, es decir que factores como la temperatura, la neblina y la lluvia producen pérdidas en la transmisión.

Las microondas son ondas electromagnéticas de radio situadas entre los rayos infrarrojos y las ondas de radio convencionales. Su longitud de onda va aproximadamente desde 1 mm hasta 30 cm. Las microondas se generan con tubos de electrones especiales como el clístrón o el magnetrón, que incorporan resonadores para controlar la frecuencia, o con osciladores o dispositivos de estado sólido especiales. Las microondas tienen muchas aplicaciones que van desde la radio y la televisión, hasta radares, comunicaciones vía satélite, etc.

3.4.4.2.2 Espectro Disperso

Una transmisión basada en tecnología de espectro disperso, distribuye la señal dentro de un cierto ancho de banda. El término "Espectro Disperso" (Spread Spectrum o SS) describe una técnica de modulación que sacrifica el ancho de banda de manera de poder ganar desempeño en la relación entre la señal y el ruido.

Básicamente en un sistema SS la señal transmitida se dispersa en una frecuencia mucho más amplia que el ancho de banda mínimo para enviar la señal. El punto fundamental es que en canales de ancho de banda estrecho con ruido, al aumentar el ancho de banda de la señal transmitida, se aumenta la posibilidad de que el mensaje se transmita de forma correcta. Si se

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

interpreta a la potencia total de la señal como el área bajo la curva de densidad espectral, entonces las señales con la misma potencia total, pueden tener una gran potencia de la señal concentrada en un ancho de banda estrecho, o una pequeña potencia de señal repartida en un ancho de banda mayor. La relativa inmunidad al ruido se logra gracias a los saltos de frecuencia durante la transmisión. Puesto que la interferencia no afecta a la amplitud de banda disponible en su totalidad, y cada salto es de 6 MHz como mínimo, el transmisor tiene más de 100 frecuencias a las que puede saltar para evitar interferencias y pérdidas de datos.

3.4.4.2.3 Satélite

Básicamente, los enlaces satelitales son iguales que los enlaces de microondas, excepto por tener uno de los puntos del canal localizado en el espacio. Los enlaces por microondas tienen como limitante la línea de vista, debido a la misma curvatura de la Tierra. Al colocar una de las estaciones en el espacio, el satélite tiene una gran cobertura sobre la Tierra con línea de vista. Al área del planeta que un satélite puede abarcar se le llama "huella del satélite".

Los enlaces satelitales logran su transmisión a través de tres componentes básicos que son dos estaciones terrenas, para enviar y recibir información, y el transpondeador (transponder). El transpondeador se localiza en el satélite y es un dispositivo que amplifica la señal de llegada (enlace de subida: unlink), la cambia de frecuencia y transmite los datos a una estación terrena receptora (enlace de bajada: down link). Para que no exista interferencia, la frecuencia de enlace de subida difiere de la de bajada, siendo la frecuencia de subida mayor, y se denotan en pares como: 12/24 GHz.

Los enlaces se establecen con satélites de órbita geostacionaria (situados a 36 000 km de la Tierra), satélites que tienen el mismo periodo de traslación alrededor de la Tierra que el periodo de rotación de la misma, por lo que las estaciones terrenas permanecen orientadas hacia una posición fija.

Un satélite típico divide su ancho de banda de 500 MHz en 12 transpondeadores, cada uno con un ancho de banda de 36 MHz. Cada transpondeador podría ser utilizado para codificar un flujo de información de 50 Mbps con 800 canales de voz de 64 kbps.

Un enlace satelital tiene grandes ventajas. La cobertura del satélite es independiente del terreno en donde se encuentren las estaciones terrenas, por lo que lugares inaccesibles pueden ser comunicados fácilmente. Las estaciones terrenas pueden verificar su propia señal transmitida al escuchar su señal de retorno del satélite. Grandes áreas pueden ser cubiertas simultáneamente con sólo una señal. Los satélites cuentan con un gran ancho de banda para la transmisión de información, que puede llegar directamente al usuario sin pasar por instalaciones adicionales.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

Las diferentes bandas y frecuencias designadas en las transmisiones vía satélite, se muestran en la Tabla 3.7

HF	3-30 MHz
VHF	30-300 MHz
UHF	300-1000 MHz
L	1-2 GHz
S	2-4 GHz
C	4-8 GHz
X	8-12 GHz
Ku	12-18 GHz
K	18-27 GHz
Ka	27-40 GHz
V	40-75 GHz
W	75-110 GHz
Mm	110-300 GHz

Tabla 3.7 Designación de bandas y frecuencias en las transmisiones vía satélite

Los enlaces satelitales presentan también grandes desventajas. La señal transmitida presenta un gran retardo (270 ms) puesto que viaja grandes distancias. Otra desventaja es en cuanto a cuestiones de seguridad. En un enlace por satélite, la información puede ser interceptada por alguien con equipo adecuado que se encuentre en la zona de recepción. Además, las pérdidas por ruta son grandes (cerca de los 200 dB) de la Tierra al satélite y éstas aumentan cuando, particularmente en altas frecuencias, existen fenómenos de absorción por lluvias.

3.4.4.3 Características de un enlace inalámbrico

Para fines de este trabajo, se utilizará el término de radio-enlace, y el de Microondas con línea de vista (LOS microwave) como sinónimos. La mayor parte de los enlaces de larga distancia utilizan actualmente un sistema de microondas. Un radio-enlace está hecho por terminales de radio y frecuentemente por una o más repetidoras separadas aproximadamente de 35 a 85 km.

3.4.4.3.1 Frecuencias empleadas y sus características

Los sistemas de comunicación por radio, satélites y microondas, usan frecuencias en el rango de los Mega y gigahertz. En general estos sistemas emplean diferentes frecuencias de forma a evitar interferencias, aunque comparten algunas de las bandas de frecuencia.

Existen ciertas ventajas al emplear estas frecuencias, tales como el hecho que se puedan tener antenas relativamente pequeñas y efectivas y que a estas frecuencias, las ondas de radio comienzan a comportarse como ondas de luz. La ventaja de esto es que las señales pueden ser enfocadas utilizando antenas parabólicas o cónicas y pueden ser reflejadas por reflectores pasivos.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

Existen también ciertas desventajas de emplear semejantes frecuencias, tales como la susceptibilidad al fenómeno "atenuación multi-rutas" (multipath fading) Este efecto causa importantes atenuaciones en la potencia de la señal. Otra desventaja es que en estas frecuencias las pérdidas por el clima resultan un factor importante. La potencia absorbida por la lluvia puede afectar seriamente la eficiencia de un canal.

La pérdida de potencia en una señal recibida es mayor para frecuencias elevadas. En este caso, se requiere una potencia mayor de transmisión para obtener los mismos niveles de eficiencia. Por ello, en enlaces por satélite, la frecuencia en la que se envía la señal desde la Tierra es mayor a la frecuencia en la que retransmite el satélite, ya que los satélites tienen una energía limitada y así las frecuencias más bajas se emplean para el enlace satélite-Tierra.

La atenuación de una señal electromagnética se debe a muchos fenómenos. Entre ellos, se encuentra la distancia entre los dos puntos, el ruido por temperatura, por condiciones ambientales, etc.

3.4.4.4 Elección del tipo de comunicación

Es conveniente analizar las posibilidades de manera de establecer la mejor alternativa a emplear para el monitoreo planteado. Existen ventajas y desventajas de cada posible forma de transmisión, que se analizarán a continuación:

Una transmisión infrarroja es útil si la transmisión se va a efectuar en un medio propenso a una gran interferencia. No requiere de una licencia por uso de frecuencia. Para poder utilizar un equipo infrarrojo, los puntos a conectar requieren tener línea de vista. Sin embargo, aunque se pueden alcanzar velocidades de transmisión de hasta 2 Mbps, esta tecnología sólo cubre hasta 25 metros de distancia, por lo que no es aplicable en este caso.

Un enlace por microondas puede atravesar muros. Como se vio anteriormente, este enlace puede unir puntos distantes de varios kilómetros. Sin embargo, se requiere de una licencia para emplear la frecuencia a la trabaja, lo que se refleja en el precio del sistema. Para esta tecnología, se requiere de un transmisor por cada punto que se desee enlazar, al igual que para el espectro disperso.

Se contempló la opción de adquirir un enlace de microondas. Aunque la mayoría de los equipos disponibles por los proveedores autorizados en México requerían el empleo de una o más repetidoras, existen equipos que sin uso de repetidora, lograrían cubrir la distancia. Sin embargo, los equipos de microondas son en general para grandes capacidades, y como mínimo se encontraron equipos que cubrían 1E1 (2 048 Mbps). Aunque la capacidad sobrada del equipo en cuestión no representaba un inconveniente para el proyecto (ya que se plantea

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

dejar abierto el sistema para incorporar, en un futuro, a este mismo esquema más sistemas de monitoreo), se encontró el inconveniente del precio (arriba de US\$ 30,000), ya que salía de cualquier presupuesto establecido para el proyecto.

La siguiente opción, establecer una transmisión por espectro disperso (Spread Spectrum) puede alcanzar velocidades *elevadas de transmisión* (2 Mbps), sin estar obligados a obtener una licencia por la frecuencia a emplear, como en el caso de las microondas. Este tipo de enlaces puede penetrar muros, pero requiere de un transmisor por cada PC que se quiera enlazar.

Este tipo de transmisión, presentaba en forma teórica el enlace con grandes ventajas (capacidad de transmisión, uso libre sin licencia, etc.). Las capacidades de los radios que se podrían emplear son de capacidades que oscilan entre los 64 y los 115 kbps. Existen radios de mucho mayor capacidad que utilizan la tecnología de espectro disperso, pero que se emplean para distancias cortas (inferiores a 8 km). Según los fabricantes, algunos de estos equipos no tendrían problemas en transmitir a esas velocidades, aun incluyendo en sus cálculos la distancia tan grande que se requería cubrir. Era entonces preciso lograr hacer pruebas para poder cerciorarse de que en realidad funcionaban para esta aplicación. Lamentablemente, hasta octubre de 1997, estos radios no estaban homologados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y por lo tanto ningún distribuidor podía venderlos en México. Por ello, se dejó de considerar esta opción, aún sabiendo que las enormes ventajas de esta tecnología podrían solucionar las necesidades del monitoreo planteado.

Se cuenta actualmente con un enlace de microondas desde el cerro Altzomoni al CENAPRED. Este enlace se emplea para mandar una señal de video. Se consideró la posibilidad de emplear el mismo enlace para el sistema de comunicación, digitalizando y canalizando la imagen de video junto con el enlace entre las computadoras. Sin embargo, aunque la antena de microondas con que se cuenta (propiedad de CEPROPIE-RTC) tiene capacidades *full-duplex*, está incompleta por lo que no es posible convertir el enlace actual en uno *bi-direccional*. Por lo tanto, dado el costo que tendría completar la antena, además de ser una antena discontinuada, se tuvo que desechar esta opción.

Otra opción que se contempló fue la de utilizar telefonía celular para la transmisión, ya que, *excepto durante el monitoreo continuo de eventos volcánicos*, la transmisión no se emplearía de forma constante. Las empresas de comunicación celular ofrecen el sistema de transmisión de datos. Sin embargo, el inconveniente de esta solución fue de tipo geográfico. *Esto debido a que las compañías celulares ofrecen este servicio dentro de la región metropolitana exclusivamente*. Al estar el cerro de Altzomoni en otra región, no fue posible emplear este servicio como medio de comunicación.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

Se estudió igualmente la posibilidad de emplear radio módems de una frecuencia asignada, como los que se emplean para transmitir otro tipo de señales de monitoreo del volcán al CENAPRED. Sin embargo, la velocidad máxima a la que pueden transmitir estos dispositivos es a 9.6 kbps. Como se estableció en los requerimientos del sistema, esta velocidad resulta baja, y no permitiría un monitoreo térmico adecuado, ni en un futuro la expansión del sistema para monitorear otros parámetros.

3.4.4.5 Selección final

Finalmente, se contempló la posibilidad de pedir ayuda a la iniciativa privada. De esta forma, *Telmex ofreció como apoyo* al CENAPRED, la colocación de un enlace punto a punto del tipo DS0. Este enlace funciona a través de microondas. El equipo empleado por la compañía, es un equipo NEC, modelo, TRP-400C6/C12, equipo que funciona en la banda de 400 MHz en UHF, en 372.25 y 390.25 MHz, para transmisión y recepción.

Tiene la capacidad de transmitir hasta 6 canales de 64 kbps (C6) o 12 canales de 32 kbps (C12). Esta capacidad se logra por medio de tarjetas adicionales, teniendo una configuración mínima de 64 kbps.

La velocidad real con que actualmente transmite es 14,400 bps, esto se debió a que para lograr los 64 kbps fue necesario solicitar una tarjeta adicional que se entregará a CENAPRED a mediados de año.

3.4.4.5.1 Características generales del equipo de comunicación:

Entre las principales características con que el equipo cuenta son las siguientes:

- Transmisión digital vía UHF: Se utiliza una modulación PCM si se utilizan 6 canales de 64 kbps; si son utilizados 12 de 32 kbps, se utiliza ADPCM.
- Posibilidad de ser utilizado como estación repetidora; ésta recibiría la información, la regeneraría y la transmitiría. Tiene también la capacidad de insertar y/o bajar información en la misma estación repetidora.
- Selección de la capacidad del canal: Capacidad óptima del canal, ya sean 6 o 12 canales, pueden ser modificados por tarjetas adicionales.
- Bandas de frecuencia: el equipo trabaja en 400 MHz, existiendo la posibilidad de funcionar en la banda de 1.5 GHz.
- Agilidad de frecuencias: un sintetizador de frecuencia es utilizado para tener un oscilador interno con alta estabilidad en frecuencia, con valor típico de 5 ppm.
- Alimentación: -24C DC o -48V DC.

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

- Transmisión de señal de servicio: señalización de tráfico es transmitida en los encabezados de la señal de datos.
- Protección de polaridad: el equipo está protegido ante alguna inversión de voltaje cometida por accidente.
- Ubicación exterior o interior: puede ser colocado en un "rack" de 19", montado en pared o, en exterior dentro de un gabinete resistente al agua.
- Diseño compacto y construcción modular: todos los componentes son modulares y compactos.

3.4.4.5.2 Especificaciones:

Las especificaciones generales del equipo TRP-400C6/C12 se mencionan en la Tabla 3.8

Frecuencia	335 MHz - 470 MHz (banda de 400 MHz) 1,427 MHz - 1,530 MHz (banda de 1.5 GHz)
Separación RF	0.5 MHz
Separación TX/RX	≥ 9 MHz (banda de 400 MHz) ≥ 40 MHz (banda de 1.5 GHz)
Modulación	4 PSK
Capacidad de transmisión	512 kbps Voz y datos: 64 kbps (PCM) x 6 canales (C6) 32 (ADPCM) x 12 canales (C12)
Característica de canal	Compatible con CCITT G.712/G.713
Orderwire	1 canal
Potencia de salida TX	+32 dBm (en la salida de TX)
Estabilidad en frecuencia TX	±5 ppm
Figura de ruido RX	5 dB
Umbral RX (VER=1x10 ⁻³)	≤ -101 dBm
Genancia del sistema	≥ 133 dB
Line circuit Interface	2 alambres, 4 alambres, 4 alambres E&M 600 ohm balanceados
ZW Charging Signal (optional)	12 kHz, 16 kHz, inversión de polaridad
Fuente de poder	-24 V DC, -48 V DC (automáticamente seleccionado)
Consumo de potencia	48 W aproximado con carga total
Temperatura de operación	-15°C a +60°C
Humedad	≤ 95% (a 35°C)
Dimensiones	482 mm x 286 mm x 360 mm
Peso (composición máxima)	18 kg aprox.

Tabla 3.8 Especificaciones generales del TRP 400

3.4.5 Configuración final

La configuración final que se implementó en el Centro de Monitoreo Volcánico en CENAPRED se muestra en la Figura 3.6

3. Diseño e implementación del sistema de monitoreo térmico

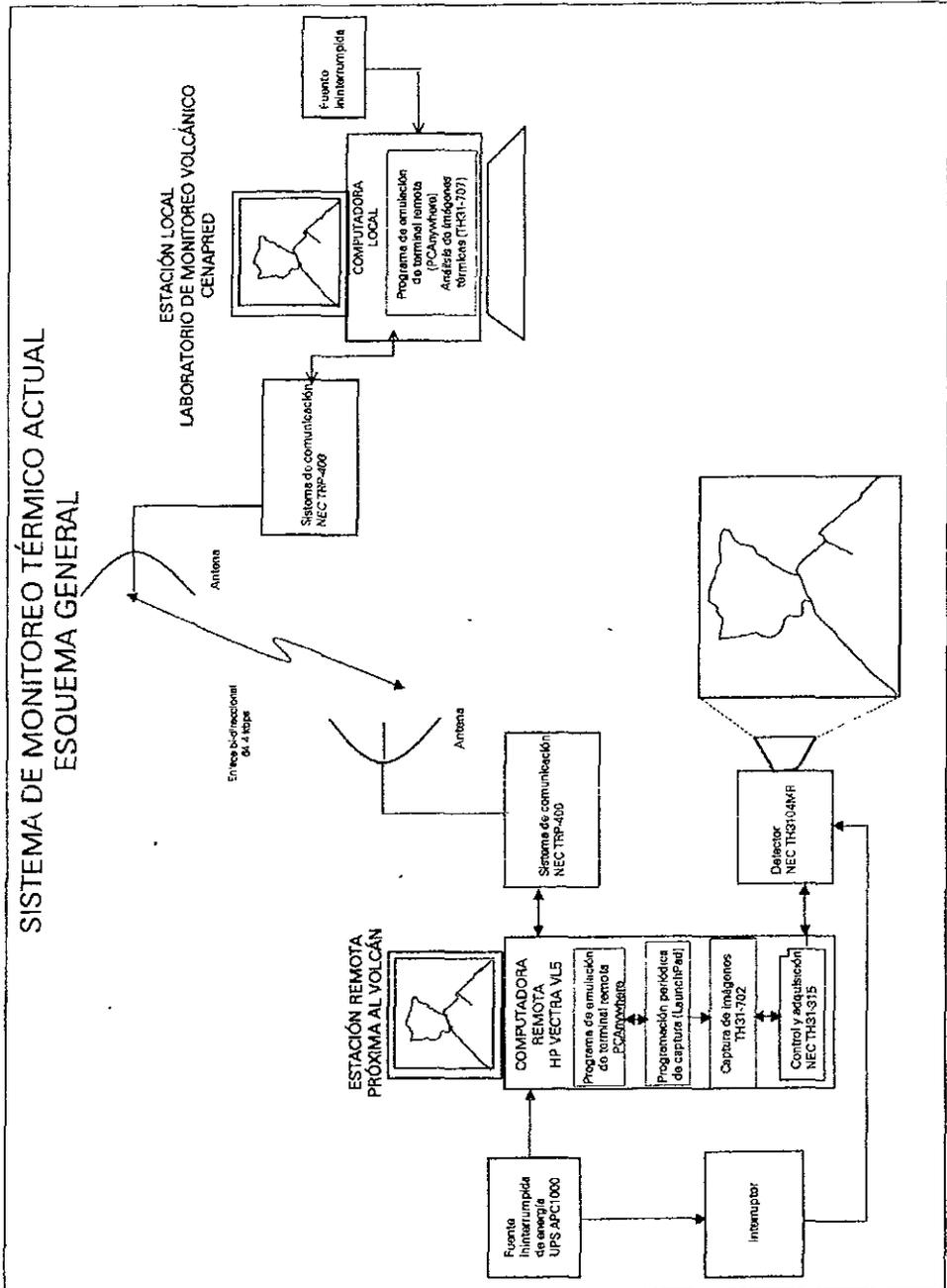


Figura 3.6 Sistema de Monitoreo térmico actual

4 Conclusiones

Este trabajo ha permitido incorporar un monitoreo térmico del volcán Popocatepetl. Este sistema representa un paso importante para el Centro de Monitoreo del CENAPRED, ya que complementa otros parámetros observados del volcán y permite tener una mejor percepción de los fenómenos precursores de su actividad. Este proyecto se logró en su totalidad, desde su propuesta hasta su realización. Además, hasta donde se tiene conocimiento, el CENAPRED es de los primeros centros, fuera de Japón, que cuentan con un sistema de monitoreo térmico con tales características: remoto e interoperable. Es decir, no solo se reciben imágenes, sino también se pueda controlar el dispositivo desde la estación local.

Como se mencionó en el Capítulo 1, el monitoreo térmico que se realiza en otras partes, se basa en sensores remotos desde estaciones móviles; ya sea desde avión y/o satélite. En estos casos, es sumamente difícil que coincida un fenómeno natural, como una fumarola, con la programación de una salida o con la órbita de paso de un satélite de percepción remota. En el sistema de monitoreo de CENAPRED se pueden capturar imágenes de forma periódica o continua, a cualquier hora, sin necesidad de salir a campo. Las limitaciones que se tienen en estos tipos de monitoreo térmico, son las condiciones atmosféricas que se presenten al momento de realizar la captura de imágenes.

Otra gran ventaja del sistema de monitoreo es la posibilidad de capturar imágenes a una hora determinada. Si se quisiese realizar un registro del comportamiento térmico de una ladera y/o glaciar, es necesario que todas las capturas se realicen bajo las mismas condiciones luminosas, por lo que, se puede programar la adquisición de la imagen a una hora del día deseada y que permanezca obteniéndose día a día sin que el operador tenga que intervenir.

La imagen térmica capturada puede ser convertida a un archivo, en Excel, por medio del mismo programa de captura (función DDE). Estas temperaturas pueden ser analizadas periódicamente, de forma automática, para obtener parámetros de magnitud de temperaturas. Si estos datos sobrepasan cierto umbral, se tendría una señal de emergencia para alertar sobre esta actividad.

La cámara térmica cuenta con zoom óptico, es decir, la resolución aumenta cuando el zoom está activado. Esta función permite un acercamiento de los objetos localizados en el centro de la imagen. Sin embargo, si se quisiese tener mayor detalle de objetos fuera del centro, el sistema se ve limitado por no tener un sistema que permita el movimiento de la cámara. Este sistema se podría implementar en un futuro, ya que se cuenta con una

4. Conclusiones

computadora personal que pudiese tener una tarjeta actuadora que mandara y recibiera señales de control a un par de mecanismos que posicionen la base de la cámara infrarroja.

Si se quisiese una medición de temperatura con mayor precisión a la que se obtendría con la ventana infrarroja, se puede implementar un sistema obturador del lente hacia el exterior. En este caso, se necesitarían un par de sensores, de temperatura y humedad, para que estuvieran periódicamente midiendo las condiciones externas de la caseta. Si las condiciones estuvieran fuera del rango de operación del equipo, el obturador *no podría ser activado* para prevenir un mal funcionamiento.

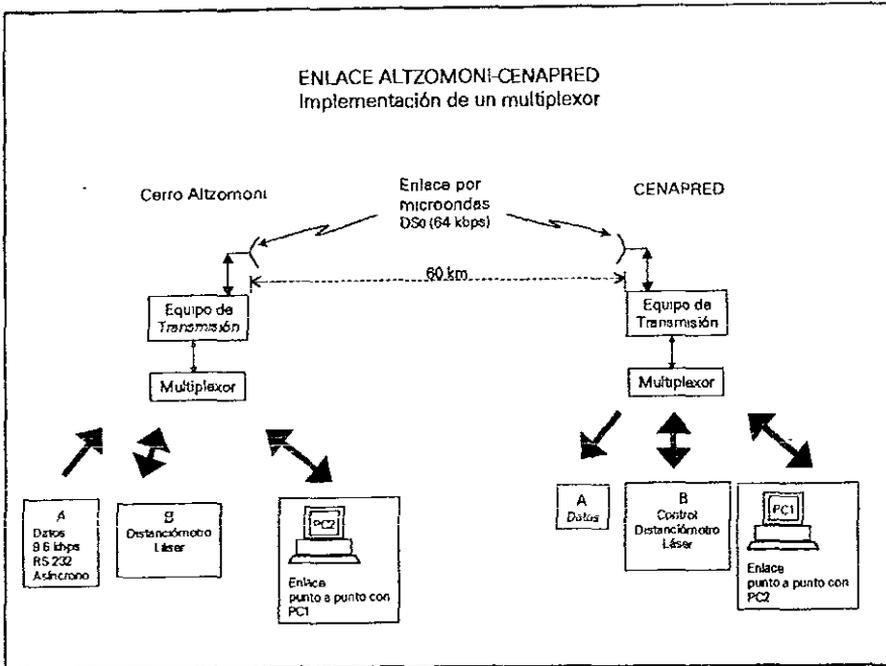
El trabajo realizado con este proyecto abre las puertas, no solamente al conocimiento de las temperaturas del volcán y sus fumarolas, sino que, además, facilita la implementación de otros equipos de instrumentación debido a que se cuenta ahora con una nueva caseta en el cerro Altzomoni, la cual permitirá acoger nuevos equipos de medición. Actualmente, esta caseta ya es empleada también para el monitoreo visual.

El enlace de alta velocidad, obtenido con el apoyo de Telmex, permitirá transmitir otras señales de monitoreo, según se requiera, para la instrumentación del volcán. Actualmente, se cuenta con un enlace de 14 400 bps; se espera que en cuatro meses se reciba una tarjeta que actualice al equipo para que funcione a 64 kbps.

Las computadoras enlazadas entre el CENAPRED y el cerro Altzomoni podrán convertir algunos de los equipos ya instalados, en interoperables y podrán servir también para adquirir nuevos datos y enviarlos al centro de monitoreo. Un esquema general que se propone utilizar para la incorporación de dispositivos a la línea de transmisión de alta velocidad, se presenta en la Figura 4.1.

El multiplexor es el dispositivo que permite combinar varias señales en un mismo canal de mayor velocidad. Una vez llegada esta información a la estación destino, se demultiplexa y se tienen cada una de las señales, como si se hubieran transmitido por separado.

La velocidad de 64 kbps, permite multiplexar varias señales de 9200 bps, velocidad suficiente para transmitir cualquier señal de telemetría que además permita ser bidireccional.



Como ejemplos de dispositivos que se pudieran agregar a este sistema de multiplexaje tendríamos: el microbarógrafo, sismómetros de *banda ancha*, *distanciómetros láser*, etc. A todos ellos se les podría implementar una terminal RS232 para que fueran conectados directamente al multiplexor. Para el caso de los dos primeros, los canales se utilizarían exclusivamente en un sentido. Para el caso de distanciómetros láser se podría realizar de forma bidireccional o interoperable: se recibirían los datos de medición, así como se podría enviar palabras que configuren al mismo dispositivo. En un futuro se podría pensar que se controlara un teodolito electrónico por la misma computadora, éste permitiría la captura de datos de varios puntos fijos en el volcán.

Inclusivo, se podría conectar al mismo multiplexor o a la computadora, una cámara de visión nocturna para poder tener registro visual del volcán durante la noche.

El sistema de monitoreo térmico aún tiene problemas, como todos los demás sistemas infrarrojos, ya que requieren de ciertas correcciones en la medición de temperaturas, esto se debe a varios parámetros que alteran la radiación infrarroja, como lo son la reflexión solar y la presencia de vapor de agua en la atmósfera. Es posible la corrección mediante procesamiento

4. Conclusiones

de imagen y una interpretación física del fenómeno. El monitoreo permite discernir el rango de temperatura, y sobre todo conocer sus diferencias y los cambios que experimentan. Se requiere también, esperar la respuesta del fabricante con quien se tuvo comunicación para la construcción de la ventana para poder reemplazar la actual, y tener una mayor confiabilidad en las imágenes captadas. Otra desventaja del sistema actual es la plataforma de software en la que se instaló; se piensa en un futuro cambiar ésta por una multi-procesos, siendo una plataforma más robusta con mejores capacidades de desarrollo. El software de programación de eventos que se empleó, LaunchPad, tiene muchas limitaciones y en un futuro se puede crear un programa especializado, una vez que se observe el funcionamiento del programa actual y se hayan establecido las modificaciones convenientes que requeriría un nuevo programa.

5 Bibliografía

- ABRAMS, Michael, Glaze Lori y Sheridan Michael. (1991), *Monitoring Colima Volcano, Mexico, using satellite data*, Bulletin of Volcanology, 53:571-574.
- BELLCORE. (1990), *Telecommunications System Engineering Volume 1: Principles*, 3a ed, Bellcore, Estados Unidos, 787 pp
- BEISER, Arthur. (1967), *Concepts for Modern Physics*, Mc Graw Hill, Tokyo, 404 pp
- CONNOR, C.B., Clement B.M., Xiaodan S., Lane S.B y West-Thomas J. (1993), *Continuous monitoring of high-temperature fumaroles on an active lava dome, Volcán Colima, México: Evidence of mass flow variation in response to atmospheric forcing*, Journal of volcanology and geothermal research, 98:19, 713-19, 722
- FISHER, Michael. (1995), *PC Interno, 2.0, Programación del Sistema*, España, Mareombo, 700 pp
- FREEMAN, Roger (1969), *Telecommunications System Engineering*, 2a ed, John Wiley & Sons, Estados Unidos, 752 pp
- GLAZE, L.S., Francis P.W., Self S. y Rothery D.A. (1989), *The 16 September 1986 eruption of Lascar volcano, north Chile: satellite investigations*, Bulletin of volcanology, 51:149-160.
- HARRIS, A.J.L. y Stevenson D.S. (1997), *Thermal observations of degassing open conduits and fumaroles at Stromboli and Vulcano using remotely sensed data*, Journal of volcanology and geothermal research, 76:175-198.
- HARRIS, A.J.L., Blake Stephen y Rothery David A (1997), *A chronology of the 1991 to 1993 mount Etna eruption using advanced very high resolution radiometer data: Implications for real-time thermal volcano monitoring*, Journal of Geophysical Research, 102:7985-8003.
- LA TOISON, Marc Henri Louis (1965), *Infrarrojo y sus aplicaciones térmicas*, Paraninfo, Madris, 192 pp.
- MELLES GRIOT. (1995), *MELLES GRIOT 1995/96, OPTICS, OPTOMECHANICS, LASERS, INSTRUMENTS, "Optical Materials"*, Estados Unidos.
- MOXHAM, R.M., Boynton G.R., Cote C.E. (1972), *Satellite Telemetry of Fumarole Temperatures, Mount Rainier, Washington*, Bulletin of volcanology, 36:191-199.
- NEC San-Ei Instruments, Ltd. (1996), *Thermo Tracer TH3100 Series, Control Unit Operation Manual*, Japón.
- NEC San-Ei Instruments, Ltd. (1996), *Data Capture Program TH31-702 Operation Manual*, Japón
- NEC San-Ei Instruments, Ltd. (1996), *TH31-702 Supplementary Operation Manual for DIF board setup*, Japón.

5. Bibliografía

- QUAAS, R., Mirano A., López B., De la Cruz S., Martínez A., Guevara E. y Castelán J. (1997), *INSTRUMENTACION PARA EL MONITOREO Y VIGILANCIA DEL VOLCAN POPOCATEPETL*, Ingeniería Civil CICM, 344:7-22
- ROBERTS, Randy (1997), *Spread Spectrum Primer*, Spread Spectrum Scene, California, 5 pp
- ROTHERY, David A. y Pieri David C. (1993), *Remote sensing of active lava*, UCL Press. 203-233
- SISTEMA NACIONAL DE PREVENCIÓN CIVIL - UNAM - CENAPRED SECRETARIA DE GOBERNACIÓN COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR CENAPRED - UNAM. (1995), *VOLCAN POPOCATEPETL ESTUDIOS REALIZADOS DURANTE LA CRISIS DE 1994-1995*, MEXICO, 339 pp.
- VINCENT, John David. *Fundamentals of infrared detector operation and testing*, (1990), John Wileyand & Sons, 477 pp.

Fuentes Diversas

Información adquirida mediante correo electrónico:

- Wooster M.J., 5 de septiembre 1997, iridley@helios.cr.usgs.gov
- Harris, Andrew, septiembre y octubre de 1997, harris@kahana.pgd.hawaii.edu
- Connor, Charles, 5 de octubre de 1997, cconnor@swri.edu

Información vía Internet:

- CENAPRED. (1997), *Monitoreo y vigilancia del volcán Popocatépetl*, Página CENAPRED: <http://www.cenapred.unam.mx/~jfg/mvolcan/popoweb.htm>
- CENAPRED. (1997), *Historia eruptiva del volcán Popocatépetl*, Página CENAPRED: <http://www.cenapred.unam.mx/~jfg/mvolcan/histpopo2.htm>
- CENAPRED. (1997), *Resumen de la actividad del volcán Popocatépetl de 1994 a 1997*, Página CENAPRED: <http://www.cenapred.unam.mx/~jfg/mvolcan/ev063097.htm>
- CENAPRED (1997), *Instrumentación del volcán Popocatépetl*, Página CENAPRED: <http://www.cenapred.unam.mx/~jfg/mvolcan/redpopo97.htm>
- CARDENTE, John. EE535 Project: *Wireless Transmission*, Página: <http://bugs.wpi.edu:8080/EE535/hwk11cd95/jcard/sec1.html>
- CYLINK Corporation. (1997), *An In-depth Spread Spectrum White Paper*, Página Cylink: <http://www.cylink.com/tutorial>
- JACHIMCZYK, Witold. (1997), *Spread Spectrum*, Página: <http://bugs.wpi.edu:8080/EE535/hwk11cd95/witek/witwk.html>

- SELF, S. and Mougini-Mark P.J. (1995), *Volcanic eruptions, prediction, hazard assessment, remote sensing, and societal implications*, School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii, USA, U.S. National Report to IUGG, 1991-1994, Página: <http://earth.agu.org/revgeophys/self00/self00.html>

Conferencias:

- QUAAS, Roberto. 17 de junio 1997, *Monitoreo y Vigilancia del volcán Popocatepetl*, Instituto de Ingeniería UNAM.

Apéndice A

Descripción y funcionamiento de la unidad de control TH31-366 de NEC

La unidad de control, encargada del proceso de las señales analógicas de temperatura recibidas de la unidad detectora y del control del sistema de escaneo, es la interfase que nos permite analizar la información capturada por el detector. Esta unidad interpreta los datos obtenidos convirtiéndolos en imágenes térmicas. Es una pequeña computadora portátil, dedicada al diálogo y control del detector. A continuación se presenta una figura ilustrando la forma y dimensiones de la unidad.

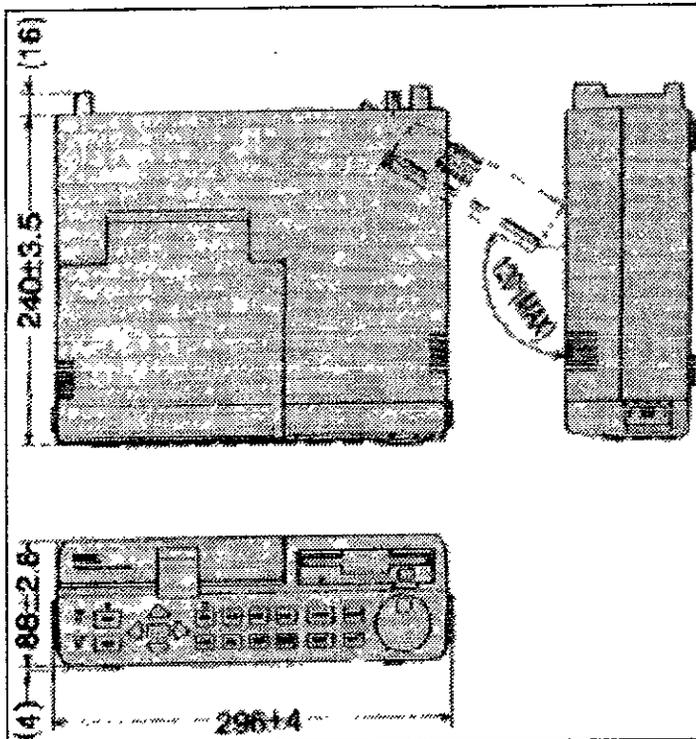


Figura A.1 Dimensiones de la unidad de control

La unidad de control, en cuanto a su funcionamiento, está formado por varios subsistemas que se describen a continuación den la Tabla A.1:

BLOQUE	FUNCION
Convertidor A/D	Este circuito convierte una señal de temperatura analógica procedente de la unidad detectora en una señal digital de temperatura de 12 bits.
Procesador de datos	Procesa la señal de la imagen termográfica obtenida.
Página de memoria de la imagen	Conserva datos de una a cuatro imágenes.
Memoria de despliegue de la imagen	Memoria usada para desplegar una imagen termográfica en el monitor LCD.
CRTC	Usada para controlar la memoria del despliegue de la imagen.
CPU pncipal	Realiza la administración y control de operaciones para la unidad de control.
CPU secundaria	Controla la comunicación con la unidad de control y entradas por teclado.
Lector de disco floppy	Maneja un disco de tipo floppy de 3.5" HD
Disco duro (HD)	Disco de 540 Mb para almacenar imágenes.
Panel de control	Teclado para la comunicación con el usuario.
Fuente de poder	Alimenta los circuitos de la unidad usando una fuente de 12 V.

Tabla A.1 Subsistemas de la unidad de control TH31-366

El almacenamiento de imágenes se hace gracias a un disco duro de 540Mb que tiene la capacidad de almacenar hasta 5000 imágenes térmicas. Para lograr organizar de forma sencilla las imágenes, éstas pueden ser separadas en bloques, teniendo las opciones que se muestran en la Tabla A.2:

Número de bloques	Número de páginas de memoria por bloque
1	5000
2	2500
5	1000
10	500
20	250
25	200
50	100
100	50

Tabla A.2 Cantidad de imágenes almacenadas en el disco duro por bloque

Al inicializar el equipo, se puede observar una pantalla como la que se ilustra a continuación en la Figura A.2:

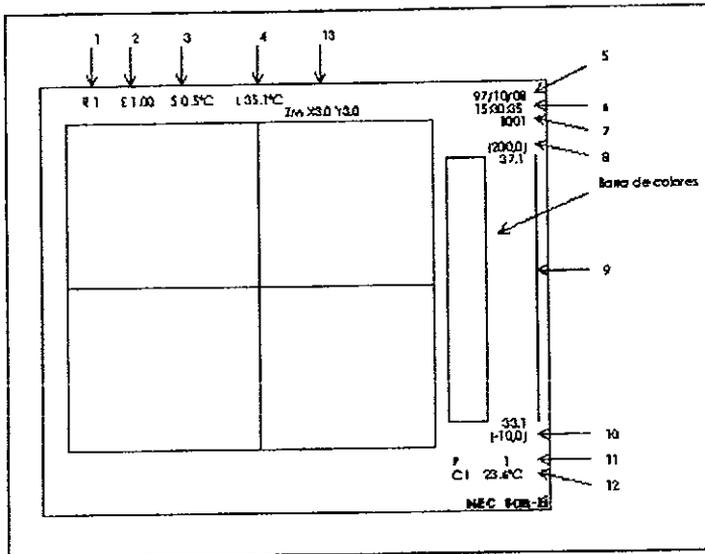


Figura A.2 Pantalla de inicialización

En la Tabla A.3, se explica cada parte, de forma a tener una referencia de los elementos que integran esta pantalla.

NÚMERO	INDICA
1	Rango seleccionado
2	Valor configurado de emisividad
3	Valor configurado de sensibilidad
4	Valor configurado de nivel
5	Fecha
6	Hora
7	Bloque del disco duro seleccionado
8	Límite superior de temperatura
9	Rango de temperatura por medio de barra de colores
10	Límite inferior de temperatura
11	Número de página que está abierta
12	Temperatura indicada por el cursor
13	Configuración del zoom (si está activo)

Tabla A.3 Localización de elementos de la unidad de control, ver Figura A.2

La unidad de control cuenta con un teclado, que permite el dialogo fácil con el usuario. Con teclas de funciones definidas, diferentes menús de opciones y una perilla de selección, la comunicación usuario – unidad de control, resulta sencilla.

A continuación, en la Figura A.3, se presenta el teclado en cuestión, así como la Tabla A.4 sintetizando las diferentes funciones de éste.

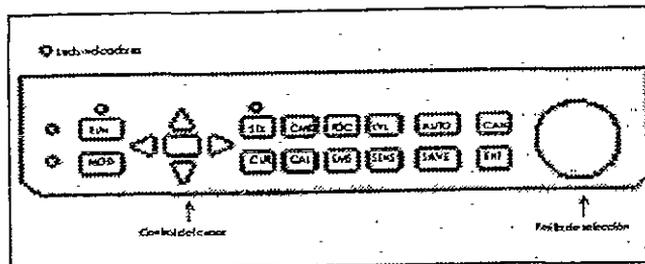


Figura A.3 Teclado de la unidad de control.

TECLA	FUNCIÓN (INGLÉS)	DESCRIPCIÓN
RUN	Run	Controla el inicio y el final de la medición. El LED correspondiente a la función de RUN. Se prende mientras el sistema de medición esté activado.
MOD	Mode	Establece el modo de adquisición de la imagen termográfica
SEL	Select	Esta tecla no tiene una función única. Es utilizada en combinación con otra tecla o la perilla de selección (jog dial) para diferentes propósitos. Cuando ésta esté activada, el LED indicador se enciende.
CUR	Cursor	Selecciona la forma del cursor a utilizar.
CMD	Command	Selecciona y despliega un menú de comandos.
CAL	Calibration of ambient temperature	Compensa las mediciones contra la temperatura ambiental.
FOC	Focus	Configura el rango de enfoque.
EMS	Emissivity	Configura la emisividad.
LVL	Level	Configura el nivel de temperatura de la imagen.
SENS	Sensitivity	Configura la sensibilidad para la imagen.
AUTO	Automatic	Ajuste automático de nivel de temperatura, sensibilidad y enfoque
SAVE	Save	Funciones para guardar la imagen en un disco flexible.
CAN	Cancel	Cancela la función en uso.
ENT	Entry	Confirma cualquier configuración o la activación de alguna función.
Jog dial		Es la perilla de selección. Permite cambiar las diferentes opciones que se tienen.
LED	Power	Encendido

Tabla A.4 Funciones en el teclado de comunicación de la unidad de control.

Menú de comandos

Al presionar la tecla CMD del panel de control, es desplegado un menú de comandos que permite realizar diversas operaciones o funciones. A continuación se presenta una tabla en la que se describen cada una de estas opciones. Algunas de estos comandos sólo son permitidos en el modo Run y/o Freeze, como se indica en la tabla.

#	Descripción		RUN/ FREEZE
1	Zoom	Se controla el ángulo de escaneo. Zoom de 1.0x a 5.0x, Res. 0.1	RUN
2	Mirror Reverse	La imagen puede ser invertida horizontalmente o verticalmente.	RUN
3	External Lens	Corrige los efectos en las mediciones de temperatura al agregar lentes externos.	RUN
4	Level Trace	Cuando se selecciona esta función, la temperatura media en la barra de colores será ajustada automáticamente a la que el cursor esté señalando. Seleccionando esta función de nuevo, se cancela el nivel de Trazo.	RUN
5	Range	Selecciona el rango de medición de temperaturas	RUN
6	Point Temp	Permite etiquetar hasta 6 puntos distintos en la imagen para conocer su temperatura en forma numérica.	R/F
7	ISO Thermal	Es la función para trazar isotermas. Permite seleccionar hasta 4 zonas con rangos de temperatura dispuestos por el usuario. Para cancelar: presionar CAN mientras se presiona la tecla SEL.	R/F
8	Out Line	Una línea blanca es sobrepuesta en la imagen denotando una única temperatura.	FREEZE
9	Multi Display	Permite desplegar las cuatro imágenes en pantalla, la actual y las tres precedentes.	FREEZE
10	Substraction	Efectúa la resta entre dos imágenes y la resultante es desplegada.	R/F
11	Box	Permite trazar hasta 5 áreas rectangulares (de la A al E) que puedan dibujarse sobre la imagen para su procesamiento.	FREEZE
12	Read Zoom	Aumenta cualquier parte la imagen en valores de 1.5, 2, 3 y 4. Para desplegar la imagen aumentada con un número estándar de píxeles se calculan los restantes puntos por medio de interpolación.	FREEZE
13	Average Temp	Lista la temperatura máxima, mínima y la media de la imagen o de los rectángulos (del A al E) si son especificados.	FREEZE
14	Histogram	Crema un histograma de la imagen: despliega la distribución de los valores de temperatura de la imagen total o del rectángulo A si fue seleccionado. Además proporciona la temperatura máxima, mínima y la media.	FREEZE
15	Floppy Disk	En este comando, se tienen las siguientes funciones: FDD DIR: directorio de los archivos contenidos en disco. FDD READ: lee un archivo del disco. FDD C-READ: lee múltiples páginas o imágenes de un disco continuamente. FDD SAVE: guarda un archivo en disco. FDD C-WRITE: guarda continuamente imágenes en disco floppy. FDD ERASE: borra un archivo en disco. FDD FORMAT: inicializa el disco para que tenga un formato.	FREEZE
16	Hard Disk	Para este comando, se tienen las siguientes funciones: HDD BLOCK: modo para dividir los datos guardados en el disco duro. Ver tabla (I) HDD BLOCK SEL: Selecciona el bloque del disco duro que estará en uso. HDD PLAY: despliega de manera continua imágenes consecutivas guardadas en un mismo bloque. HDD COPY: Copia los datos correspondientes de una imagen de un bloque a otro.	FREEZE
17	Color	Cambia la selección de color por una de las siguientes opciones: COLOR POSI, COLOR NEGA, MONO POSI y COLOR NEGA. La cantidad de colores, en cada uno, es de 256, 128, 64, 32 y 16.	R/F
18	Memo	Permite hacer notas en la imagen. Coloca caracteres en cualquier lugar de la imagen. El cambio entre los caracteres se logra por medio del JOG DIAL.	R/F
19	Time Set	Cambia la hora y la fecha interna del controlador.	R/F
20	Set Enviroment	Configura parámetros del ambiente como: alarma, fecha, °C/°F, formato del disco floppy, cambio en los prefijos de nombre de archivos, volumen, brillo, etc.	R/F

Tabla A.5 Menú de comandos CMD, para mayor detalle consultar NEC San-Ei Thermo Tracer TH3100 Operation Manual.

Apéndice B

Especificaciones generales DIF board B ^{#1}

La tarjeta interfaz TH31-315 adquiere las imágenes y habilita el control total de la cámara infrarroja TH3104MR; es para bus de tipo estándar (ISA: Internal Standard Adapter) y su configuración no es de tipo *plug&play*, por lo que su configuración (interrupciones, dirección de memoria, direcciones de entrada/salida, etc) tiene que hacerse manualmente.

Sus especificaciones generales, en cuanto a su conexión, están descritos en la Tabla B.1.

Tópicos de configuración	Valor y/o dirección	Observaciones
IRQ Interrupciones	IRQ10/IRQ11/IRQ15	La tarjeta tiene un error de impresión: en lugar de decir IRQ15 dice IRQ12. El correcto es IRQ15. La configuración de fábrica es IRQ10.
DMA Canal de Acceso Directo a Memoria	Canal 3 de DMA	-
I/O Add. Dirección de entradas y salidas	Ver Tabla B.4	El rango de memoria puede ser modificado por medio de interruptores (DIP switch) focalizados en la tarjeta. La rango de memoria configurado en fábrica: F140H a F14FH
Memory Address Dirección de Memoria	Ver Tabla B.3	El rango de memoria puede ser modificado por medio de interruptores (DIP switch) focalizados en la tarjeta. La rango de memoria configurado en fábrica: DF000H a DF7FFH

Tabla B.1 Especificaciones generales para la conexión de DIF Board B

Direcciones

Existen dos series de interruptores (8-p DIP SW) sobre la tarjeta, S1 y S2. La tabla siguiente muestra las configuraciones de fábrica de ambos interruptores.

El núm. 1 del S1 es un valor preestablecido que no debe ser modificado.

Del núm. 2 al 6 del mismo S1, son direcciones de memoria, que pueden ser modificadas.

^{#1} NEC San-ei Instruments, Ltd., TH31-702 Supplementary Operation Manual for DIF board setup.

En la Tabla B.2, se muestran las distintas configuraciones que puede tener la tarjeta en cuanto a sus direcciones.

Opción	S 1								Dirección memoria	Dirección I/O
#1	*	0	0	1	1	1	*	*	DC00H	C1**H
#2	*	0	0	1	1	0	*	*	DC80H	C9**H
#3	*	0	0	1	0	1	*	*	DD00H	D1**H
#4	*	0	0	1	0	0	*	*	DD80H	D9**H
#5	*	0	0	0	1	0	*	*	DE80H	D9**H
#6	*	0	0	0	0	1	*	*	DF00H	F1**H
#7	*	0	0	0	0	0	*	*	DF80H	F9**H

Tabla B.2 Distintas direcciones posibles para direc. mem. en S1

Los núm. 7 y 8 del mismo S1, son direcciones para los puertos de entrada/salida (I/O), que pueden ser modificados como se muestra en la Tabla B.3:

Opción	S 1								Dirección I/O
#1	*	*	*	*	*	*	1	1	**40H
#2	*	*	*	*	*	*	1	0	**50H
#3	*	*	*	*	*	*	0	1	**60H
#4	*	*	*	*	*	*	0	0	**70H

Tabla B.3 Distintas direcciones posibles para I/O en S1

NOTA: La sene de interruptores S2 no debe ser modificada.

Precauciones

Para el cuidado óptimo de la tarjeta, el fabricante recomienda:

- No modificar continuamente la configuración de *jumpers*.
- No tocar directamente las terminales de los *jumpers*.
- Antes de insertar la tarjeta en la computadora, asegurarse de colocar de una manera correcta los *jumpers*.
- El cambio del iRQ también tiene que ser indicado en la PC.

Guía de Referencia rápida del programa de captura TH31-702

Para mayor referencia sobre este programa consultar el propio manual.⁶²

El programa de captura TH31-702 presenta las imágenes térmicas en pantalla captadas por el detector y su comandos son parecidos a los ya mencionados para la Unidad Detectora en el Apéndice A

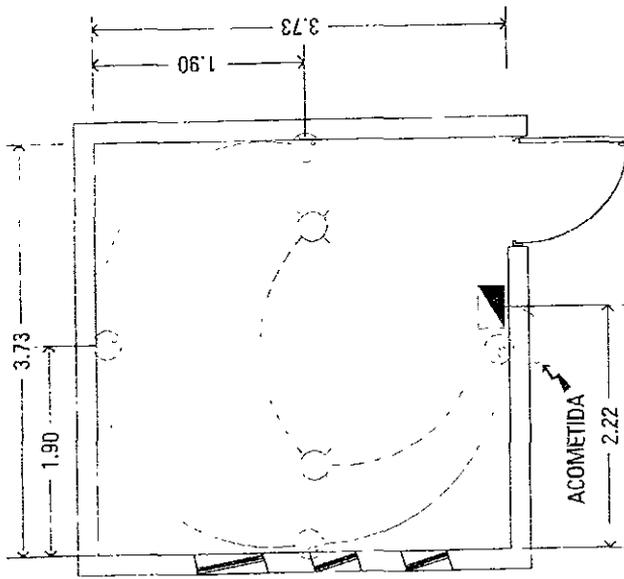
Existen dos tipos de estado en cuanto al funcionamiento del equipo térmico, modo de captura de imágenes continuas (RUN) y el congelamiento de la imagen actual para su análisis (FREEZE) Las demás funciones estarán condicionadas al modo (Freeze o Run) en que el equipo esté trabajando en el momento que se quiera realizar alguna función.

⁶² NEC San-ei Instruments, Ltd , *Data Capture Program TH31-702 Operation Manual*.

Se nombrarán los procedimientos más importantes a continuación en la Tabla B.4

Objetivo	Procedimiento	Observaciones y/o condiciones
Abrir pantalla de captura	File, Open, Capture, CH1	Se abre una pantalla de captura en CH1
Congelar la imagen térmica actual	FREEZE	Comando condicionado a modo RUN
Enfoque automático	FULL AUTO	Ajuste automático del enfoque, nivel y sensibilidad, modo RUN
Acercamiento "Zoom"	ZOOM	Zoom óptico, desde 1x hasta 5x, con resolución de 0.1, modo RUN
Cambio de color	COLOR	Cambia el modo del despliegue de color
Modo de escaneo	SCAN MODE	Varias opciones de escaneo como la superposición de imágenes y otros más.
Modo de adquisición	RUN MODE	Varias opciones de adquisición como la captura/guardada de imágenes continuas y otras más.
Análisis	WAVE	Activar el despliegue del perfil vertical y horizontal de la imagen IR.
	M.POINT	Configuración para obtener la temperatura en varios puntos y/o áreas.
	ISO	Configuración para la obtención de isotermias
	MEMO	Desplegar comentario sobre la imagen térmica: máx. 52 caract.
Edición	SAVE	Guarda imagen(es) térmicas
	File, PRINT	Imprime la ventana de la imagen
	Edit, Copy	Copia en el <i>Clipboard</i> la ventana de la imagen
	Edit, DDE, Transfer	Envía datos a un programa de hoja de cálculo
	Edit, Copy to file	Guarda la imagen como archivo de mapa de bits (*.bmp)
Salir	File, Exit	Sale del programa
Ajuste de temperaturas	Level	Ajusta el valor medio de la escala térmica (Nivel)
	Sens	Ajusta el tamaño de la escala térmica (sensibilidad)
Abrir imagen de archivo	File, Open, Replay, CH1-CH5	Abre hasta 5 (sucesiones) imágenes distintas existentes en archivo.

Tabla B.4 Procedimientos básicos TH31-702



INSTALACIÓN ELÉCTRICA

SIMBOLOGIA	
	SALIDA DE CENTRO
	TABLERO INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO SQUARE-D 2:10A, H=160cm
	TENDIDO DE POLIDUCTO TIPO RIGIDO 1/2" APARENTE FIJADO CON ABRAZADERA/TIQUETE @90cm
	TENDIDO DE POLIDUCTO TIPO RIGIDO 1/2" AHOGADO EN MUROS Y LOSA
	CONTACTO ATERRIZADO DUPLEX (2x 2P + TI) LEGRAND PRESTIGIO 995-593 (1.9A-127V), H=80cm
	APAGADOR SENCILLO LEGRAND PRESTIGIO 995-595 (1.0A-127V), H=60cm.

PROYECTO	CASETA DE MONITOREO VOLCÁNICO		
UBICACIÓN	CERRO ALTZOMONI	Jefe de obra	CENAPRED - UNAM
	AMECAMECA, EDO DE MEXICO		
PLANO	INSTALACIÓN ELÉCTRICA		
	A2		
ESCALA	1 : 50	FECHA	15 - NOV - 97

Figura C.2 Instalación eléctrica de la nueva caseta en el Cerro de Altzomoni

Apéndice D

Comandos Básicos del LaunchPad v. 2.7

El programa LaunchPad permite la realización automática de distintas tareas, dentro de las cuales se pueden mencionar: ejecución de un programa, envío de teclas, activación de mensajes en pantalla, etc. Estas tareas pueden ser ejecutadas por intervalo o ciertas condiciones que el usuario fije.

En la Tabla D.1, se muestran algunas funciones básicas para el uso del software.

Función	Procedimiento
Abrir una rutina	File, Open, Archivo.lpd
Activar una rutina	Seleccionar la rutina Seleccionar icono de rayo en la barra principal
Detener el envío de botones durante la rutina	Seleccionar icono de tecla en la barra principal

Tabla D.1 Funciones y procedimiento básicos del LaunchPad 2.7

La configuración del programa Launch Pad 2.7 es sencilla y se basa en seis pantallas de configuración, mismas que aparecen cuando se realiza un doble click con el botón izquierdo del ratón sobre la subrutina que se quisiera modificar.

La pantalla general de programa "Captura imagen actual" es la que se muestra en la Figura D.1.

El primer rengón, que indica en su campo de descripción: ACTIVAR PCANYWHERE, se trata de una subrutina que se actualiza cada 2 segundos y que activa el programa de PCAnywhere, junto con una secuencia de teclas e intervalos, para que siempre la computadora remota esté configurada para establecer la comunicación con la computadora local.

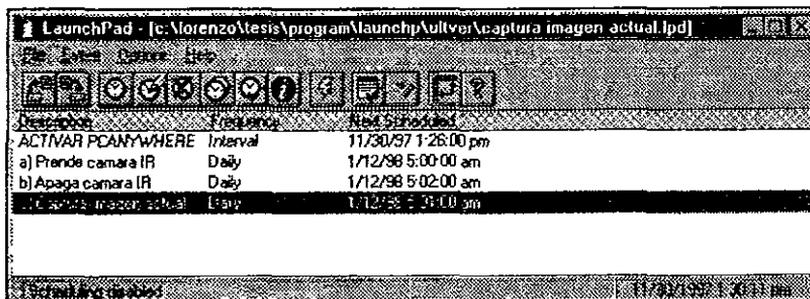


Figure D.1 Ventana general del LaunchPad 2.7

La subrutina antes mencionada, únicamente se activa bajo una condición: que esté inactiva la ventana del programa de emulación de terminal remota.

La primer pantalla de configuración, "Action", se muestra en la Figura D.2. Se observa el campo de la descripción del evento, la acción que se va a efectuar (p. ej. correr un programa) con su respectiva ruta de acceso.

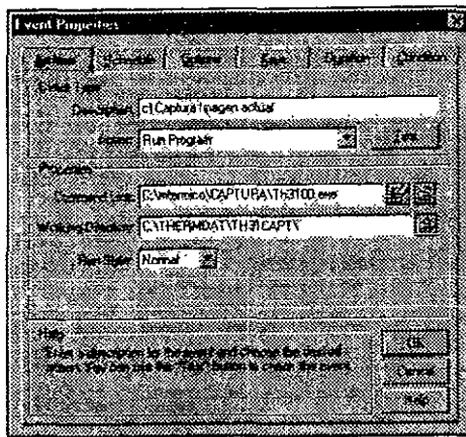


Figura D.2 Primer pantalla de configuración: "Action"

En la Figura D.3, se muestra la segunda pantalla, "Schedule". En ésta se fija la periodicidad con que una subrutina sea activada; ya sea por, intervalo fijo (hora, mes, año) o por intervalo variable (ajuste manual).

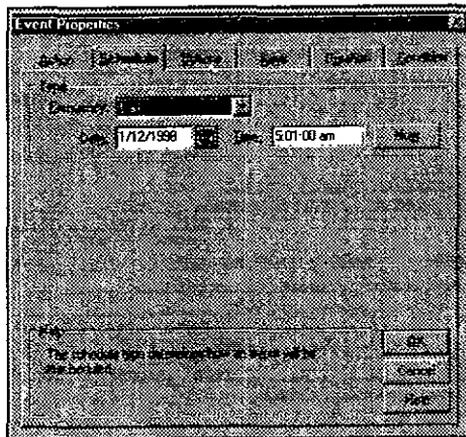


Figura D.3 Segunda pantalla de configuración: "Schedule"

En la Figura D.4, se muestra la pantalla, "Options". Existe la posibilidad, por ejemplo, de tener un archivo registro ("log to file") que contenga la hora en que fue activada esa subrutina

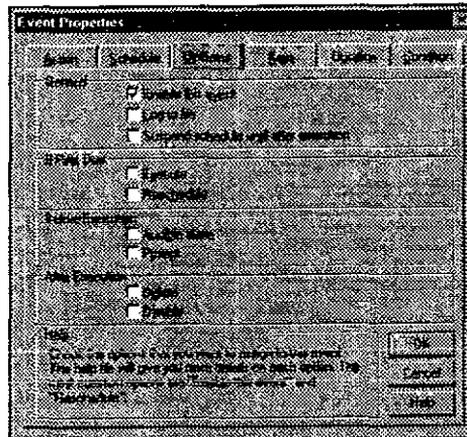


Figura D.4 Tercera pantalla de configuración: "Options"

En la Figura D.5, se muestra la cuarta pantalla, "Keys". Es en esta pantalla donde la rutina del envío de teclas se realiza. La subrutina esperará 14 s antes de empezar a mandar teclas.

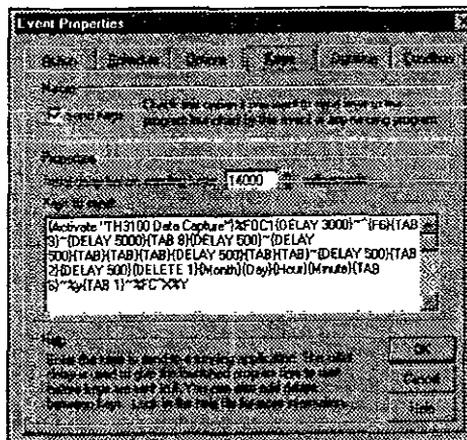


Figura D.5 Cuarta pantalla de configuración: "Keys"

En la Figura D.6, la pantalla de "Duration" se presenta. Se tiene la posibilidad de limitar la activación de la subrutina hasta cierta fecha y hora establecida por el usuario; de lo contrario, la subrutina es realizada cada cierto tiempo y/o condición.

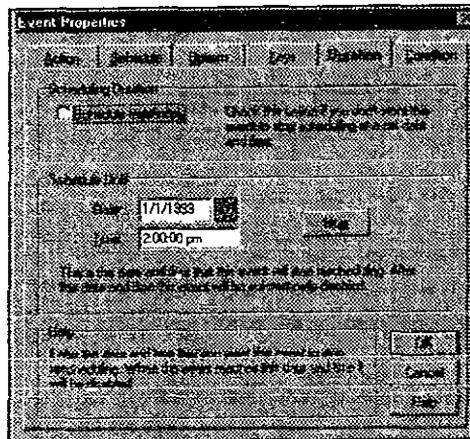


Figura D.6 Quinta pantalla de configuración: "Duration"

En la Figura D.7, se presenta la sexta y última pantalla "Condition". Existen distintos tipos de condiciones por las cuales una rutina puede ser activada o desactivada.

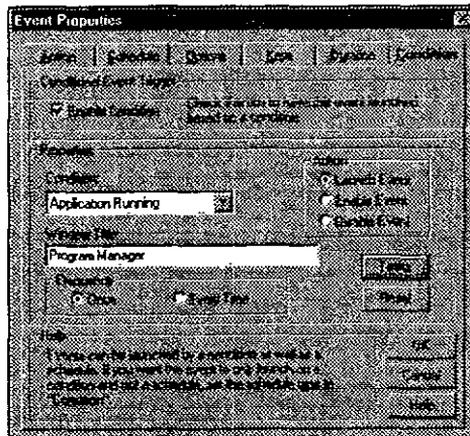


Figura D.7 Sextima pantalla de configuración: "Condition"

En la Tabla D.2 se mencionan diferentes teclas con su respectiva nomenclatura que tiene que ser usada dentro del espacio "SEND KEYS", antes mencionado.

Tecla	Código
Shift	+
Control	^
Alt	%
BackSpace	{BKSP}
Break	{BREAK}
Caps Lock	{CAPSLOCK}
Clear	{CLEAR}
Del	{DELETE}
Down Arrow	{DOWN}
End	{END}
Enter	{ENTER} or ~
Esc	{ESC}
Help	{HELP}
Home	{HOME}
Ins	{INSERT}
Left Arrow	{LEFT}
Num Lock	{NUMLOCK}
Page Down	{PGDN}
Page Up	{PGUP}
Print Screen	{PRTSC}
Right Arrow	{RIGHT}
Scroll Lock	{SCROLLLOCK}
Tab	{TAB}
Up Arrow	{UP}
F1	{F1}
F2	{F2}
F3	{F3}
F4	{F4}
F5	{F5}
F6	{F6}
F7	{F7}
F8	{F8}
F9	{F9}
F10	{F10}
F11	{F11}
F12	{F12}
F13	{F13}
F14	{F14}
F15	{F15}
F16	{F16}

Tabla D.2 Nomenclatura de teclas para el LaunchPad

Para especificar teclas presionadas al mismo tiempo: "Tecla1(Teclas2)". Por ejemplo, para tener la tecla de Alt, E y A, al mismo tiempo: "%(EA)".

Para especificar teclas repetidas se utiliza el formato de: {tecla número}; es necesario dejar un espacio entre la tecla y el número. Por ejemplo, {TAB 8} significa presionar la tecla TAB 8 veces.

En la Tabla D.3 se mencionan otras opciones de comandos internos, que no tienen una tecla asignada

Comando	Función	Formato de salida
{Actívatelo "LaunchPad"}	Colocar la ventana "LaunchPad" como ventana activa	-
{Delay X}	El programa ejecuta un retraso de X milisegundos	-
{Date}	Escribe la fecha:	mm/dd/aa
{Time}	Escribe la hora:	hr:min:seg am/pm
{Day}	Escribe el día:	1 al 31
{Month}	Escribe el mes:	1 al 12
{Year}	Escribe el año:	XXXX
{Hour}	Escribe la hora:	0 a 23 hrs
{Minute}	Escribe el minuto:	0 a 59
{Second}	Escribe el segundo:	0 a 59

Tabla D.3 Comandos internos que no tienen una tecla asignada

Para mayor información sobre el software LaunchPad v. 2.7, referirse al archivo de ayuda del mismo programa LaunchPad.hlp.

Índice de Fotos, Figuras y Tablas

Fotos

Foto 1.1 Volcán Popocatepetl	2, 14
Foto 1.2 Instalaciones y procesamiento de información del volcán en CENAPRED	10, 14
Foto 1.3 <i>Fachada exterior del CENAPRED</i>	14
Foto 2.1 Equipo térmico disponible	15, 30
Foto 2.2 Registro sísmico (CENAPRED) de la estación Canario del evento que provocó la fumarola de la Foto 2.5 y Foto 2.6.	27
Foto 2.3 Imagen visible desde Metepec Pue.	30
Foto 2.4 Imagen infrarroja desde Metepec Pue., anomalía en el lado Sureste.	30
Foto 2.5 Imagen visible desde el cerro de Altzomoni Edo. Méx., fumarola en la banda visible del espectro.	31
Foto 2.6 Imagen infrarroja desde el cerro de Altzomoni Edo. Méx., fumarola en la banda infrarroja del espectro.	31
Foto 2.7 Imagen visible del domo de lava del volcán el día 21 de febrero de 1997, vista Sur-Este.	31
Foto 2.8 Imagen térmica, del domo de lava del volcán el día 21 de febrero de 1997, vista Sur-Este.	31
Foto 3.1 Cerro de Altzomoni; 1. Edificio y antena de Televisa, 2. Caseta cedida a CENAPRED por Televisa, 3. Caseta de CENAPRED (PPA/IIA), 4. Repetidora de Telmex.	38
Foto 3.2 Vista exterior de la nueva caseta en cerro de Altzomoni	38
Foto 3.3 Interior de la nueva caseta en cerro de Altzomoni	38
Foto 3.4 Primera imagen del volcán obtenida desde la nueva caseta y recibida en CENAPRED.	38
Foto 3.5 <i>Ubicación de las dos opciones para la instalación del equipo térmico</i>	40
Foto 3.6 Vista aérea del volcán y del cerro de Altzomoni	40
Foto 3.7 Brigada de monitoreo volcánico en el cerro de Altzomoni	40

Figuras

Figura 1.1 Estaciones de la red de monitoreo del volcán Popocatepetl.	4
Figura 1.2 Red de monitoreo del volcán Popocatepetl.	6
Figura 1.3 Diagrama general en bloques del puesto central de registro	9
Figura 2.1 Espectro electromagnético.	17
Figura 2.2 Radiación de cuerpo negro: Ley de Planck	20
Figura 2.3 Dimensiones en mm del detector	25
Figura 2.4 Esquema del detector TH3104MR	25
Figura 3.1 Gráfica de apertura del equipo dada por el fabricante.	33
Figura 3.2 Esquema de monitoreo propuesto, con sus dos estaciones: la del cerro Altzomoni a 11 km del volcán, y la del centro de monitoreo volcánico en CENAPRED	36
Figura 3.3 Diagrama de transmitancia de la ventana del ZnSe	41
Figura 3.4 Diagrama de transmitancia de la ventana del Zafiro	41
Figura 3.5 Diagrama del circuito empleado para el control del encendido y apagado desde el puerto serie.	46
Figura 4.1 Implementación con multiplexor en el enlace entre Altzomoni y CENAPRED	63

Índice de Fotos, Figuras y Tablas

Figura A.1 Dimensiones de la unidad de control	68
Figura A.2 Pantalla de inicialización	70
Figura A.3 Teclado de la unidad de control.	71
Figura C.1 Planta Arquitectónica de la nueva caseta en el Cerro de Altzomoni	76
Figura C.2 Instalación eléctrica de la nueva caseta en el Cerro de Altzomoni	77
Figura D.1 Ventana general del LaunchPad 2.7	78
Figura D.2 Primer pantalla de configuración: "Action"	79
Figura D.3 Segunda pantalla de configuración: "Schedule"	79
Figura D.4 Tercera pantalla de configuración: "Options"	80
Figura D.5 Cuarta pantalla de configuración: "Keys"	80
Figura D.6 Quinta pantalla de configuración: "Duration"	81
Figura D.7 Sextima pantalla de configuración: "Condition"	81

Tablas

Tabla 1.1 Localización e instrumentación de las estaciones de la red de monitoreo del volcán Popocatepetl.	5
Tabla 2.1 Especificaciones generales del sensor TH3104MR	16
Tabla 2.2 Bloques que conforman internamente al detector	24
Tabla 3.1 Fenómenos naturales a monitorear con periodicidad	35
Tabla 3.2 Listado de "Captura Periódica"	47
Tabla 3.3 Rutina empleada para grabar una imagen térmica cada hora	48
Tabla 3.4 Listado de "Captura Continua"	49
Tabla 3.5 Rutina empleada para grabar una sucesión de imágenes térmicas cada 10 segundos por 10 minutos	50
Tabla 3.6 Tiempo de actualización de pantalla y de transferencia de archivos para distintas velocidades de transmisión	51
Tabla 3.7 Designación de bandas y frecuencias en las transmisiones vía satélite	55
Tabla 3.8 Especificaciones generales del TRP 400	59
Tabla A.1 Subsistemas de la unidad de control TH31366	69
Tabla A.2 Cantidad de imágenes almacenadas en el disco duro por bloque	68
Tabla A.3 Localización de elementos de la unidad de control, ver Figura A.2.	70
Tabla A.4 Funciones en el teclado de comunicación de la unidad de control.	71
Tabla A.5 Menu de comandos CMD, para mayor detalle consultar Control Unit Op. Man.	72
Tabla B.1 Especificaciones generales para la conexión de DIF Board B	73
Tabla B.2 Distintas direcciones posibles para direcc. mem. en S1	74
Tabla B.3 Distintas direcciones posibles para I/O en S1	74
Tabla B.4 Procedimientos básicos TH31-702	75
Tabla D.1 Funciones y procedimiento básicos del LaunchPad 2.7	78
Tabla D.2 Nomenclatura de teclas para el LaunchPad	82
Tabla D.3 Comandos internos que no tienen una tecla asignada	83