



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL

PROYECTO DE TRABAJO DE TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA

OMAR ARIOSTO NIÑO PRIETO

MATRÍCULA: 200221170

ASESOR: DR. ENRIQUE COLMENARES GUILLEN FCC-BUAP

COASESOR: M. EN C. JOSÉ CASTILLO ROMÁN CUPREDER-BUAP

PUEBLA, PUE. 2008

A mis padres Froylán Ariosto y María Guadalupe.

A mis hermanas, Marilú y Citlallin.

A mis sobrinos, Daniel y Andrea.

A mis profesores, amigos, compañeros y familiares
por su apoyo y motivación durante toda mi formación universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco al Dr. Enrique Colmenares Guillén por su tiempo asesoría y consejos; por los conocimientos aprendidos durante el curso de Sistemas de Tiempo Real para realizar esta tesis, y por la motivación para presentarla en congresos de nivel Nacional e Internacional.

Le agradezco al Dr. Manuel I. Martin Ortiz por sus sugerencias en el diseño del sistema, por su tiempo y experiencia. Le agradezco al M.en C. Esteban Torres León por las sugerencias finales en la redacción.

Le agradezco también al equipo de trabajo del CUPREDER de la BUAP por medio del M.en C. José Castillo Román que me proporcionó los requerimientos del sistema.

Agracezco también a la BUAP, que me dió la oportunidad de realizar una estancia en l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA de Lyon, Francia) gracias al convenio mantenido; a su apoyo académico y económico que me permitió aprender la metodología del diseño utilizada para el proyecto de esta tesis. Así como al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP) por la beca otorgada durante el periodo de realización.

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

EL SIGUIENTE TRABAJO DE TESIS TIENE LA APROBACIÓN A NIVEL INTERNACIONAL PARA PRESENTARSE EN EL CONGRESO DE IEEE ANDESCON 2008 A REALIZARSE EN OCTUBRE DE 2008 EN LA CIUDAD DEL CUSCO, PERÚ, CON UN ARTÍCULO PUBLICADO CON ISBN; Y TIENE TAMBIÉN LA APROBACIÓN EN EL CONGRESO NACIONAL SENIE DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA A REALIZARSE EN AGUASCALIENTES EN OCTUBRE DE 2008 PUBLICADO CON ISSN.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 TRABAJO RELACIONADO AL MONITOREO VOLCÁNICO	PAG.
1.1 SISTEMA CON SENSORES INALÁMBRICOS.....	10
1.2 SISTEMA DE MONITOREO MAGNET.....	11
1.3 SISTEMA DE MONITOREO DEL CENAPRED.....	11
1.4 VARIACIONES VULCANOMAGNÉTICAS DEL VOLCÁN DE COLIMA.....	12
1.4.1 MONITOREO MAGNÉTICO.....	13
1.5. SISTEMA DE VIGILANCIA VOLCÁNICA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN), ESPAÑA.....	14
1.6 MEDICIONES DE CAMPO MAGNÉTICO EXISTENTES.....	15
CAPÍTULO 2 ARQUITECTURA GENERAL: SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL	
2.1 INGENIERIA DE SOFTWARE, OBJETIVOS Y CALIDAD DEL SISTEMA.....	17
2.2 ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA.....	21
2.3 MATERIAL UTILIZADO Y REQUERIMIENTOS TÉCNICOS.....	22
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DEL SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL	
3.1 INGENIERÍA DE SISTEMAS.....	24
3.2 DISEÑO DEL SOFTWARE.....	26

3.3 SA-RT.....	26
3.3.1 DIAGRAMA DE CONTEXTO DEL SISTEMA.....	27
3.3.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS.....	28
3.3.3 DIAGRAMA DE ESTADO TRANSICIÓN.....	29
3.4 ARQUITECTURA MATERIAL.....	30
3.4.1 DIAGRAMA DE CONTEXTO DE LA ARQUITECTURA.....	30
3.4.2 DIAGRAMA DE INTERCONEXIÓN.....	30
3.5 LACATRE.....	31
3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	33

CAPÍTULO 4 PROPUESTA PARA PREDECIR EVENTOS EN EL SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL BASADO EN LA INFORMÁTICA BIO-INSPIRADA Y ALGORITMOS DE REDES NEURONALES.

4.1 INFORMÁTICA BIO-INSPIRADA.....	42
4.2 LA INFORMÁTICA TRADICIONAL Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	43
4.3 EL CEREBRO Y LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	44
4.4 LA NEURONA BIOLÓGICA.....	48
4.5 LA SINAPSI.....	49
4.6 LA NEURONA ARTIFICIAL.....	50
4.7 PREDICCIÓN DE EVENTOS VOLCÁNICOS.....	53

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR DE SOFTWARE DEL SISTEMA.....55

CONCLUSIÓN Y TRABAJO A FUTURO

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO

INTRODUCCIÓN

Los volcanes activos son un riesgo para las sociedades que viven cerca de estos colosos, por ello es necesario estudiarlos para poder predecir algún acontecimiento catastrófico que incluye grandes pérdidas humanas y materiales, dañando la economía de la región. Estos eventos no se pueden evitar, pero si se pueden prevenir con el objetivo de tener las menores pérdidas posibles ya sean humanas o materiales.

Los sistemas de software nos ayudan a predecir estos eventos, y gracias a la tecnología, se puede saber si habrá algún evento con un poco más de anticipación que antaño; por lo que la tecnología es una herramienta indispensable para prevenir a la población de este tipo de eventos.

El monitoreo volcánico es un trabajo riesgoso que requiere de tiempo para determinar manualmente el estado de un volcán activo utilizando herramientas sofisticadas para lograr el objetivo. Por lo que se necesitan sistemas computarizados que faciliten esta tarea. Actualmente existen sistemas que miden la actividad del volcán Popocatepetl en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) estudia la actividad del volcán Popocatepetl con la ayuda del Centro Universitario de Prevención de Desastres Regionales (CUPREDER), dependencia de la BUAP. Los instrumentos que permiten sensar la actividad volcánica, son: algunos sensores de tierra, electrodos, así como dos magnetómetros. La información ha sido obtenida gracias al trabajo de campo realizado y cierta información es recolectada con la ayuda de un magnetómetro. Los resultados son analizados por especialistas que pueden dar un pronóstico de la actividad volcánica.

El reto comienza porque se carece de un sistema de tiempo real de monitoreo magnético y los datos obtenidos dentro del trabajo de campo son insuficientes. El equipo de trabajo conformado por personas de diferentes áreas, como geólogos, vulcanólogos, ingenieros, se tiene que trasladar directamente al volcán para obtener los datos. Por cada sesión es necesario invertir un día entero para obtener información del volcán, además de los gastos de traslado, alimentación y personal.

También existen desventajas visibles en el sistema de monitoreo volcánico del CENAPRED, con el daño del radar doppler meteorológico [3] y la gran cantidad de computadoras utilizando sistemas antiguos, y la dificultad para acceder a los datos de la actividad volcánica registrada, de manera externa por causa de inflexibilidad.

La contribución directa después del estudio de factibilidad del sistema a partir de la ingeniería de requerimientos [12] y los beneficios sociales a corto, mediano y a largo plazo son conocer la información de la actividad del volcán Popocatepetl para poder implementar programas de protección civil en un menor tiempo y en caso de que exista actividad intensa, salvar el mayor número de vidas y tratar de tener un impacto económico positivo debido a la prevención. Los usuarios reales serán los geólogos y vulcanólogos de la BUAP y CUPREDER quienes analizarán la información recibida para tener más elementos de planeación y de protección civil. Los beneficiados serán todas las personas que habitan en comunidades cercanas al volcán y los habitantes de la ciudad de Puebla.

El siguiente trabajo de tesis se divide en los siguientes capítulos: capítulo 1 *introducción*, se presenta el planteamiento del problema, capítulo 2 *Trabajo Relacionado al monitoreo volcánico* se presentan los sistemas existentes, en el capítulo 3 *Sistema Propuesto: Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real* se analizan los objetivos del sistema y la propuesta del sistema en tiempo real, en el capítulo 4 *Metodología del sistema de monitoreo volcánico en tiempo real* se discute el diseño del sistema, en el capítulo 5 *Aproximación de la informática bio-inspirada y algoritmos de redes neuronales en el Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real* se presenta una explicación teórica de la informática Bio-inspirada y algoritmos de Redes Neuronales Artificiales que buscan proponer una predicción de alguna erupción volcánica o de alguna actividad anormal. En el capítulo 6 *Resultados* se analizan los resultados y las pruebas preliminares del Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real mediante un simulador de software. Por ultimo en la *Conclusión y trabajo a futuro*, se dan las conclusiones junto con el trabajo a realizarse posteriormente para la implementación real del sistema en general.

CAPÍTULO 1

TRABAJO RELACIONADO

1.1 SISTEMA CON SENSORES INALÁMBRICOS

Actualmente investigadores de Harvard han colocado un conjunto inalámbrico de sensores para monitorear la actividad sísmica en Ecuador. Los sismólogos recogen grandes cantidades de datos, pero la carga de los instrumentos que bajan al volcán se verán aligerados tanto en costo como en peso al ser inalámbricos. Científicos de computación de esta Universidad se unieron con sismólogos de la Universidad de New Hampshire y de la Universidad de Carolina del Norte para colocar un equipo inalámbrico en un pico ecuatoriano y monitorear la actividad volcánica. Los sensores ayudan a los investigadores, oficiales, y residentes locales, a comprender la actividad volcánica y planificar acciones de emergencia ante las erupciones del Tungurahua, uno de los volcanes más activos de Ecuador en los últimos años.

Los investigadores instalaron la red inalámbrica en el Tungurahua y recogieron durante 54 horas datos durante un viaje reciente a la montaña de 5.016 metros de elevación. El sistema inalámbrico podría eventualmente reemplazar a los sensores con cable utilizados en la actualidad.

Los sistemas utilizados para monitorear la actividad volcánica recogen rápidamente enormes cantidades de datos, Los sistemas con cable que se utilizan ahora para monitorear a los volcanes, son de costo elevado y agotan rápidamente sus baterías; esto obliga a las personas a subir las laderas de los volcanes frecuentemente durante varios días para recuperar los datos que se han acumulado.

Estos investigadores instalaron una red de cinco diminutos módulos, sensores inalámbricos de baja energía, equipados con un micrófono especial para monitorear las señales infrasónicas (acústica de baja frecuencia) emitidas durante las erupciones. Cada uno de ellos funciona con dos baterías AA, está sellado en un contenedor a prueba de agua del tamaño de una jabonera, y transmite datos automáticamente a un puesto de observación que se encuentra a más de 8 kilómetros de distancia. [1].

1.2 SISTEMA DE MONITOREO MAGNET

El sistema MAGNET fue desarrollado en Italia para monitorear la actividad del Monte Etna. Los investigadores coinciden de que existe una correlación significativa entre la actividad volcánica y el campo geomagnético observado en diversos volcanes activos. Una de las desventajas de los sistemas de minitoreo volcánico, es el acceso limitado a los datos del monitoreo en espacio y tiempo, por lo que este sistema propone la transmisión rápida *on-line* de la información mediante sensores y un sistema computarizado. El sistema cuenta con varios magnetómetros de alta resolución, una compilación de sistemas de cómputo que utilizan el tipo PC/104 Standard compatible con la arquitectura PC/AT. La información es transmitida por teléfonos móviles utilizando el sistema GSM en la banda de 900 Mhz. El software utilizado para el sistema está desarrollado en C++ con la estructura de tipo Cliente-Servidor [2].

1.3 SISTEMA DE MONITOREO DEL CENAPRED

El sistema de vigilancia y monitoreo del volcán Popocatépetl ha demostrado su utilidad en la evaluación de la actividad del volcán desde 1994. En un esfuerzo conjunto del CENAPRED, de la Secretaría de Gobernación; de los Institutos de Geofísica e Ingeniería, de la UNAM; y con la colaboración del Observatorio Vulcanológico de los Cascades (CVO), y del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*U.S. Geological Survey*); se estableció en los últimos años un moderno y completo sistema de observación telemétrico con una central de adquisición y procesamiento de datos. Este sistema, ha logrado 6 años de funcionamiento sin interrumpirse. Esto ha permitido la vigilancia estrecha del volcán Popocatépetl así como la detección oportuna de cualquier cambio en su estado de actividad. La red de monitoreo del Popocatépetl actualmente está compuesta por 15 estaciones localizadas en las laderas circundantes del volcán, en sitios con altitudes de hasta 4300m y a 1.5 Km del cráter. La instrumentación consta de 8 sismógrafos de periodo corto y 3 de banda ancha; 4 inclinómetros biaxiales para medir deformación; una cámara de video controlada en forma remota desde el CENAPRED con enlace de microondas; 3 detectores de flujo en el costado norte del volcán; un radar doppler meteorológico (actualmente dañado); una cámara térmica y diversos equipos para mediciones geodésicas, análisis químicos, determinación de las concentraciones de gases SO₂ y CO₂.

Más de 50 señales de telemetría son transmitidas en forma continua hacia el puesto central de registro y procesamiento localizado en el CENAPRED. Allí se reciben todas las señales y mediante una extensa red de computadoras, la actividad es monitoreada y procesada las 24 horas del día.

Al detectarse cualquier incremento anormal de la actividad sísmica del volcán, se acciona una alarma acústica y a través de un sistema de marcado automático se envían mensajes a teléfonos particulares, celulares y radio-localizadores del personal de guardia, indicando la intensidad de las señales en diferentes estaciones sísmicas. [3]. Sin embargo, una de las desventajas es el daño del radar doppler meteorológico y la gran cantidad de computadoras utilizando sistemas antiguos que datan desde 1994 y que carecen de la precisión de los sistemas actuales.

1.4 VARIACIONES VULCANOMAGNÉTICAS DEL VOLCÁN DE COLIMA

Dentro de la actividad volcánica, existe la posibilidad de que las variaciones del campo magnético terrestre puedan ser asociadas a eventos volcánicos, y ha permitido a diferentes autores reportar estas alteraciones como precursoras de la actividad volcánica. En los volcanes activos monitoreados magnéticamente se ha visto que el efecto termo-magnético es el más importante debido a la gran cantidad de energía termal concentrada y disipada a través del cráter por medio de la actividad fumarólica y expulsión de productos volcánicos como piroclastos y lava. Cualquier efecto termo-magnético está fuertemente asociado al contenido y tipo de minerales ferromagnéticos que conforman las tocas [14].

La investigación de las variaciones vulcano-magnéticas se ha realizado en diferentes volcanes y de diferente forma, dependiendo del número de magnetómetros disponibles para su estudio. Por ejemplo, el volcán Izu-Oshima en Japón, se estudió con 5 magnetómetros fijos hasta 1986 y actualmente se investiga con una red de 10 magnetómetros fijos y 15 estaciones de medición; el volcán La Soufriere (Guadeloupe) en la Isla Reunión (Francia), tiene 5 magnetómetros fijos y 10 estaciones de medición; el volcán Aso en Japón con 4 magnetómetros fijos y 13 estaciones de medición, el volcán Merapi en Indonesia con 6 magnetómetros fijos; el volcán Monte Santa Helena en Estados Unidos, se estudiaba con 3 magnetómetros fijos antes de la gran explosión del 18 de mayo de 1980 y actualmente se investiga con 5 magnetómetros fijos; el volcán Kilauea en Hawái, con 3 magnetómetros fijos; el volcán Ruapehu en Nueva Zelanda; el volcán Vulcan en Italia con 2 magnetómetros fijos y, finalmente,

el volcán Popocatepetl en México con 2 magnetómetros fijos [14].

1.4.1 MONITOREO MAGNÉTICO

El estudio de las variaciones vulcano-magnéticas se efectuó a través de monitorear el comportamiento del campo magnético terrestre en la sección Atenquique-El Playón. Las mediciones de campo magnético se tomaron con magnetómetros de precisión nuclear Geometrics G-816/826-A y G-856 y están dadas en nanoTeslas (nT) [14]. Este estudio se inició realizando primeramente mediciones magnéticas a lo largo de una sección de 35 kilómetros, con estaciones de lectura cada 500 metros, las cuales se indicaron en el terreno con estacas para su reocupación periódica, y marcando cada 3 kilómetros con una mojonera para mejor referencia [14]. Los resultados iniciales reflejan la existencia de tres zonas con comportamientos magnéticos distintos a lo largo de la sección y de un conjunto de anomalías de alta frecuencia y amplitudes diversas y por cambios magnéticos temporales de baja amplitud. Los datos de las anomalías sugieren que las variaciones temporales en la magnetización en la zona del volcán están causadas por cambios en la temperatura. En particular, el proceso de magnetización/desmagnetización bajo el cono y áreas asociadas a la actividad eruptiva pueden contribuir a los cambios [14].

En la primera etapa de este estudio se observó que de los tres dominios magnéticos interpretados en la sección Atenquique-El Playón de 35 km de largo y ubicada en el flanco este del volcán de Colima, presentó los cambios magnéticos más notorios en tiempo y espacio, por lo que se procedió a ubicar una serie de estaciones de lectura del campo magnético dentro y fuera del piso del cráter del protovolcán de Colima, la mayoría de ellas ubicadas en la zona denominada El Playón.

El monitoreo magnético del volcán de Colima se realizó mediante diversas estaciones de monitoreo magnético (estaciones: A, B, C, IGF, estación del km 44) y se registraron diversas variaciones vulcanomagnéticas como precursoras a la actividad volcánica de 1998-1999. Los estudios de las variaciones espacio/temporales del campo geomagnético están principalmente basados en los registros continuos y discretos de las redes de observatorios geomagnéticos. Los datos se usan para establecer los modelos globales de referencia, como el Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) [14].

La metodología que hasta el momento ha presentado los mejores resultados como precursora de

actividad volcánica, es aquella que compara los resultados de las mediciones de la intensidad de campo magnético terrestre dentro y fuera de la estructura geológica volcánica. En este estudio en el volcán de Colima se empleó un magnetómetro para la medición de la intensidad del campo magnético terrestre, por lo cual no fue posible aplicar completamente la metodología para la investigación de las variaciones vulcano-magnéticas. Sin embargo, se desarrolla una metodología alternativa de medición de actividad magnética como precursora de actividad magmática para aquellos volcanes que por limitaciones instrumentales cuenten con un sólo magnetómetro. Para la observación de los efectos vulcano-magnéticos en los volcanes se comparan las mediciones del campo magnético entre los diferentes magnetómetros de los cuales al menos uno de los instrumentos debe ubicarse fuera del ámbito volcánico y tomando las mediciones de éste como referencia para las mediciones de los otros magnetómetros.

El campo magnético total en la estación de referencia se mide cada determinado tiempo y se compara con las mediciones de los otros magnetómetros que a su vez miden al mismo tiempo la intensidad del campo magnético. Las diferencias en la intensidad del campo magnético entre la estación base y cada uno de los magnetómetros se analiza y se interpreta el tipo de efecto vulcano-magnético causante de dichas variaciones [14].

1.5. SISTEMA DE VIGILANCIA VOLCÁNICA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN), ESPAÑA

En Junio de 2004 se estableció en España un sistema de “Observación, vigilancia y comunicación de la actividad volcánica y determinación de riesgos asociados” ampliando las labores de los diferentes Servicios de Red Sísmica, Geodesia, Geomagnetismo y Gravimetría, así como del Centro Geofísico de Canarias. Desde entonces, el IGN ha trabajado en el diseño e implementación de un Sistema de Vigilancia y Alerta Volcánica cuyo proyecto se está poniendo en marcha, primero en la isla de Tenerife para luego extenderse en el resto de islas volcánicamente activas.

Este proyecto incluye el diseño de estaciones sísmicas, geodésicas y geofísicas, del sistema de comunicaciones, y de procesamiento y análisis de datos que permita realizar un seguimiento continuado de los cambios de los parámetros físicos asociados a la actividad volcánica, y constituya un sistema operativo de alerta (en sus fases de tranquilidad o actividad). Actualmente en la isla de Tenerife existen 2 estaciones sísmicas de banda ancha (CRAJ y EBAJ) y tres de corto periodo (CCAN, CICO y CHIO) diseñadas y distribuidas para el control de la sismicidad de la isla, que resultan insuficientes

para las labores encomendadas de vigilancia volcánica. Por este motivo, alguna de ella se ha reforzado con un nuevo y mejorado diseño de su infraestructura (CCAN) y se ha planeado la instalación de 5 nuevas estaciones geofísicas y geodésicas. Además se ha ampliado la Red de Nivelación de Alta Precisión hasta alcanzar los 307 Km, se ha diseñado una densa Red Gravimétrica para la medida absoluta de la gravedad y se ha ampliado la Red de Mareógrafos [20].

Estas estaciones geofísicas y geodésicas contribuirán con datos en tiempo real, e irán dotadas con la siguiente infraestructura [20]:

- **CCAN:** estación sísmica de 3 componentes de banda ancha, estación sísmica de corto periodo, gravímetro, magnetómetro, estación GPS permanente y dilatómetro.
- **Galería de Río de Guía:** inclinómetro, array sísmico lineal, estación GPS permanente.
- **Fortaleza:** array sísmico de 4 estaciones con configuración en estrella, cámara de control visual, estación GPS permanente.
- **Pico del Teide:** cámara térmica en el infrarrojo, estación GPS permanente.
- **Morro de la Arena:** estación sísmica de banda ancha.

1.6 MEDICIONES DE CAMPO MAGNÉTICO EXISTENTES

La aplicación de métodos electromagnéticos para el seguimiento de la actividad volcánica ha alcanzado gran desarrollo en los últimos años, aunque su implementación se limita a un número escaso de volcanes. Las técnicas usuales son el estudio de las variaciones del campo magnético, el potencial espontáneo y la resistividad. Estas técnicas también se están ensayando como precursores sísmicos [21].

Para el estudio de los fenómenos volcano-magnéticos, idealmente debe disponerse de tres magnetómetros sincronizados en tiempo y con resolución de 1 nanotesla. Deben de estar situados dos sobre la zona activa y el tercero que sirva de referencia a pocos kilómetros de distancia. De esta forma es posible por diferencia cancelar las perturbaciones debidas causas externas. Es posible realizar la sincronización mediante sistemas de telemetría en tiempo real o una sincronización mediante receptores GPS en sistemas que operen en tiempo diferido, sin embargo la mayor dificultad para implementar un dispositivo de este tipo es la necesidad de conseguir una resolución mayor a 1 nanotesla, ya que la amplitud de las señales vulcano-magnéticas es muy pequeña [21]. Esto exige instalar los magnetómetros en puntos donde el gradiente del campo magnético sea pequeño, lo cual es

muy difícil de conseguir en volcanes activos debido al carácter fuertemente magnético de los materiales volcánicos. También es importante cuidar otros efectos como evitar la acumulación de cenizas ya que estas son magnéticas y pueden provocar la aparición de falsas anomalías. Igualmente ocurre con los dispositivos complementarios de la estación magnética como los paneles solares, las baterías y en general en las conexiones en donde circulen corrientes importantes. Se debe de poner especial atención al sistema de telemetría, ya que no debe transmitir al mismo tiempo cuando el magnetómetro está realizando las mediciones por causa de interferencia. Un magnetómetro nunca debe de situarse dentro de las proximidades de una estación sísmica ya que los geófonos van provistos de potentes imanes y los sistemas de telemetría utilizados transmiten en modo continuo [21].

CAPÍTULO 2

ARQUITECTURA GENERAL: SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL

2.1 INGENIERIA DE SOFTWARE, OBJETIVOS Y CALIDAD DEL SISTEMA

Los sistemas de monitoreo y vigilancia son muy importantes en la evaluación y en los pronósticos de la actividad de los volcanes. Por lo que es vital pronosticar, monitorear y evaluar la actividad volcánica de forma automatizada.

Se tiene como objetivo general proponer un sistema automatizado en Tiempo Real para la monitorización del volcán Popocatepetl que facilite la gestión de datos en la prevención de desastres naturales. Como objetivos específicos de la aplicación se consideran los siguientes puntos:

- 1) Crear una implementación en Tiempo Real para un sistema empotrado (embedded) basado en los datos recibidos de los magnetómetros (dispositivos de hardware).
- 2) Proporcionar información automatizada de la actividad volcánica a la ciudad más próxima al volcán Popocatepetl: Puebla.
- 3) Obtener información inmediata para implementar acciones de prevención, protección civil, alerta y evacuación.
- 4) Proponer un módulo de predicción de algún evento anormal dentro de la actividad magnética del volcán, mediante el estudio de la informática bio-inspirada y algoritmos de redes neuronales [4].

El sistema es factible ya que contribuye a la realización satisfactoria de los objetivos presentados previamente, ya que actualmente se requiere de mucho tiempo, esfuerzo y gasto obtener los mismos datos durante los trabajos de campo realizado por el CUPREDER de la BUAP.

Los Sistemas de Información son desarrollados para resolver problemas y necesidades que la sociedad demanda y conforme va creciendo la complejidad del sistema, se necesita mucha más precisión y el nivel de exigencia de sistemas complejos se incrementa. Estos sistemas complejos necesariamente deben de tener una modelización de calidad que tiene como objetivo ofrecer un producto final que sea capaz de resolver la problemática de una manera segura y efectiva; teniendo en

cuenta que el fallo del sistema podría tener consecuencias graves de diferentes magnitudes. La calidad del software está relacionada con las exigencias funcionales y no funcionales del sistema, desde el punto de vista del *producto final*, como propiedad intrínseca del producto de software independiente de la manera como fue construída y del proceso de *desarrollo del software* con el objetivo de controlar la forma en la que el software fue desarrollado para obtener un producto final de calidad (CMM, ISO9000) [5, 17]. Dentro del Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real, intervienen otros dispositivos que interactúan directamente con el sistema de software y si falla alguno de ellos, inevitablemente todo el funcionamiento del sistema tendrá consecuencias de gran importancia, por lo que el concepto de calidad tiene que ser implementado en todo el sistema, tanto en el software, hardware y dispositivos que interactúan directamente con el programa.

Un producto de software de calidad depende directamente de la calidad del proceso que se utilizó para su diseño y posteriormente la implementación del mismo; [5, 17] para comenzar a hacer un diseño de calidad fue necesario analizar las exigencias funcionales (las funciones que tendrá el futuro sistema de software) y las exigencias no funcionales (las necesidades técnicas y de hardware que tendrán una influencia directa sobre el desempeño del software) del sistema general que se muestran en la tabla I [5, 17].

TABLA I
EXIGENCIAS FUNCIONALES Y DE HARDWARE DEL SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL

EXIGENCIAS FUNCIONALES	EXIGENCIAS DE HARDWARE
<ul style="list-style-type: none"> ● Captar el magnetismo del volcán Popocatepet. ● Enviar los datos con la menor pérdida de información y evitar la pérdida o corrupción de datos. ● Recibir los datos de una manera eficiente. ● Transmitir los datos reales de forma inalámbrica. ● Mostrar el resultado del monitoreo dentro de un sistema de software. ● Almacenar la información del monitoreo. ● Accesar a la información almacenada para su análisis y el uso de la información por medio de personas especializadas. ● Tener una interacción humano-computadora amigable y fácil de manipular. ● Tener un programa modular para facilitar la actualización y futuras modificaciones al software. ● Tener un sistema que sea 'Evolutivo' para implementar funciones futuras y actualización del programa. ● Tener un sistema de alarma automático dentro del software para indicar que existe una actividad normal. ● Poseer un sistema de predicción en caso de detectarse cierto comportamiento anormal que avise una posible incidencia volcánica. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Tener 2 magnetómetros funcionando de una manera autónoma con placas solares electrónicas. ● Utilizar un microcontrolador adecuado capaz de transmitir datos inalámbricos y con conexión a internet mediante un puerto Ethernet. ● Tener una Base de Datos con una capacidad de almacenamiento adecuada. ● Contar con una computadora de última generación con el Sistema Operativo Linux compatible con las librerías de RTSJ. ● Disponer de un servidor de Internet para manipular y acceder a los datos sobre el monitoreo volcánico en la red. ● Contar con un ruteador que permita crear un tunel de comunicación segura utilizando Ethernet ● Tener un sistema inalámbrico de localización de los magnetómetros de tipo GPS para su rastreo vía satélite.

El sistema se encuentra dentro del nivel de exigencias de tipo A debido a la magnitud del fenómeno según la Norma internacional *ISO/CEI 9126* que define los niveles de exigencia para un dominio de aplicación, según los riesgos o los daños ocurridos después de la falla de un *Sistema de*

Información mostrados en la Tabla II [5, 17].

TABLA II
NIVEL DE EXIGENCIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN

DOMINIOS DE APLICACIÓN	NIVEL DE EXIGENCIA D	NIVEL DE EXIGENCIA C	NIVEL DE EXIGENCIA B	NIVEL DE EXIGENCIA A
Seguridad humana	Daño menor de bienes, sin riesgo a la vida de las personas.	Daño de bienes y riesgo hacia la integridad de las personas.	Riesgo de pérdidas humanas.	Riesgo de pérdidas humanas numerosas. (Catástrofe)
Economía	Pérdida económica muy baja.	Pérdida económica considerable	Pérdida económica importante. (Compañía en peligro)	Desastre financiero. (Riesgo de la desaparición de la compañía)
Seguridad en el sistema	Ningún riesgo existente.	Riesgo de errores.	Servicios e información críticas.	Servicios e información críticos estratégicos de la empresa.
Medio Ambiente	Ningún riesgo para el medio ambiente.	Deterioro del medio ambiente.	Deterioro importante del medio ambiente, pero aún recuperable	Deterioro del medio ambiente irreversible.

Debido a la clasificación tipo 'A' dentro la norma *ISO/CEI 9126*, el sistema debe de cumplir las características de calidad que parten del modelo de McCall [17], proporcionando un cuadro de comparación que especifica, evalúa o compara la calidad del software y permite un acercamiento analítico de la evaluación. El cumplimiento de las normas de calidad es necesario para la implementación del Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real ya que pertenece al tipo de sistemas críticos dentro de los cuales están en juego muchos factores importantes como la supervivencia de numerosas vidas humanas y prevención de desastres financieros que una catástrofe

natural ocasiona. Las 6 características de la calidad *ISO/CEI 9126* en un sistema de software se muestran en la Tabla III [5, 17].

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DEL SOFTWARE

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Capacidad Funcional	Todas las funciones del sistema responden a las necesidades transmitidas inicialmente.
Fiabilidad	El software satisface las condiciones de tiempo, plazo y duración determinadas.
Fácil utilización	El software es manipulado de manera eficaz y rápida sin necesidad de recurrir a la documentación, es decir de manera intuitiva.
Rendimiento	Mayor optimización de memoria del sistema y tiempo de ejecución.
Mantenimiento	Cualidad que tienen los sistemas para ser modificados mediante corrección, mejoramiento, evolución del sistema, adaptaciones, y tiempo de utilización. i.e. Uso durante 1 año o durante 20 años.
Portátil	Capacidad de adaptarse a diferentes ambientes de desarrollo, plataformas, máquinas y Sistemas Operativos.

2.2 ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA

Se utilizan 2 magnetómetros (M1, M2) sobre 2 puntos estratégicos sobre las faldas del volcán Popocatepetl para monitorear el magnetismo de manera autónoma; dicha autonomía también es referente al modo de alimentación de los dispositivos, ya que mediante un estudio de uso, los dispositivos pueden ser alimentados mediante placas solares y tarjetas electrónicas diseñadas para ello. Dichos dispositivos necesitan de una interfaz de Hardware para transmitir la información magnética de forma inalámbrica a una red de tipo GSM, que a su vez la transmitirá por Internet y finalmente los datos serán recibidos por el Sistema de Monitoreo en Tiempo Real basado en *RTSJ (Real Time Specification for Java)* para efectuar el monitoreo volcánico en una computadora de última generación que contenga los programas ejecutables del software. El sistema también cuenta con la comunicación

mediante el sistema GPS para identificar la ubicación de los magnetómetros (Figura1).

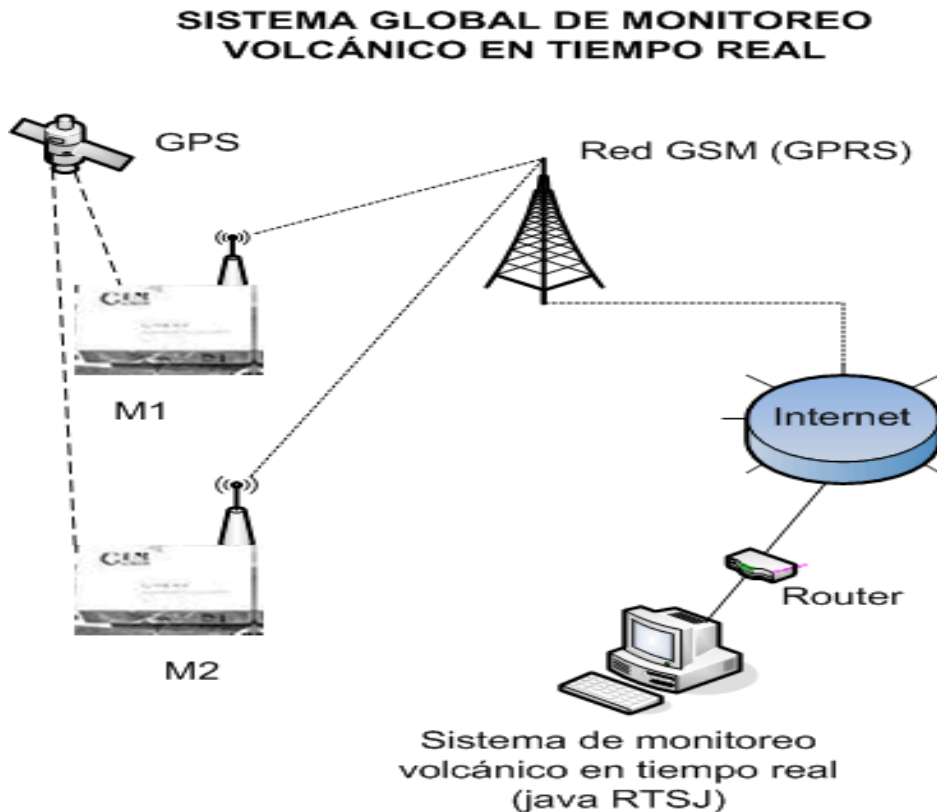


FIGURA 1. DIAGRAMA DE LA ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA.

2.3 MATERIAL UTILIZADO Y REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Se propone un sistema de Tiempo Real que use los dispositivos existentes: dos magnetómetros instalados en las cercanías del volcán Popocatepetl que registran la actividad magnética del volcán. Se incorpora un sistema de transmisión de datos mediante la conversión de la señal analógica a digital y transportada por medio inalámbrico hasta el centro de investigación del CUPREDER de la BUAP. Para lograr la transmisión adecuada de información se propone la utilización de un microcontrolador que sea capaz de transmitir mensajes mediante un puerto Ethernet con acceso a la red, y también un módulo de identificación con un puerto para la comunicación GPS.

El sistema de cómputo incluye una computadora con una capacidad de almacenamiento de 250 GB para guardar toda la información proveniente del monitoreo magnético en una Base de Datos creada para ello. El motor de Base de datos es MySQL. Tiene como Sistema Operativo alguna distribución de LINUX compatible con las librerías del RTSJ de JAVA para los sistemas de tiempo real i.e.: SUSE 10, DEBIAN, Fedora, y como nueva propuesta Red Hat y FREE BSD. El software está desarrollado utilizando las librerías del RTSJ que reciben las señales enteras provenientes de los magnetómetros. Posteriormente dichos datos se guardan y son interpretados por otro programa con una interfaz gráfica de usuario (GUI). El proyecto tiene integrado un sistema de alarma automático, que alertará a las autoridades y personas competentes automáticamente en caso de registro de actividad volcánica anormal.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DEL SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL

3.1 INGENIERÍA DE SISTEMAS

La ingeniería de sistemas es una actividad interdisciplinaria que conjunta equipos de personas de diferentes disciplinas que intervienen directamente en el diseño y son necesarios debido al amplio conocimiento requerido para considerar todas las implicaciones de las decisiones en el diseño del sistema. Esta relación de disciplinas se muestra en la (Figura 2) [12].

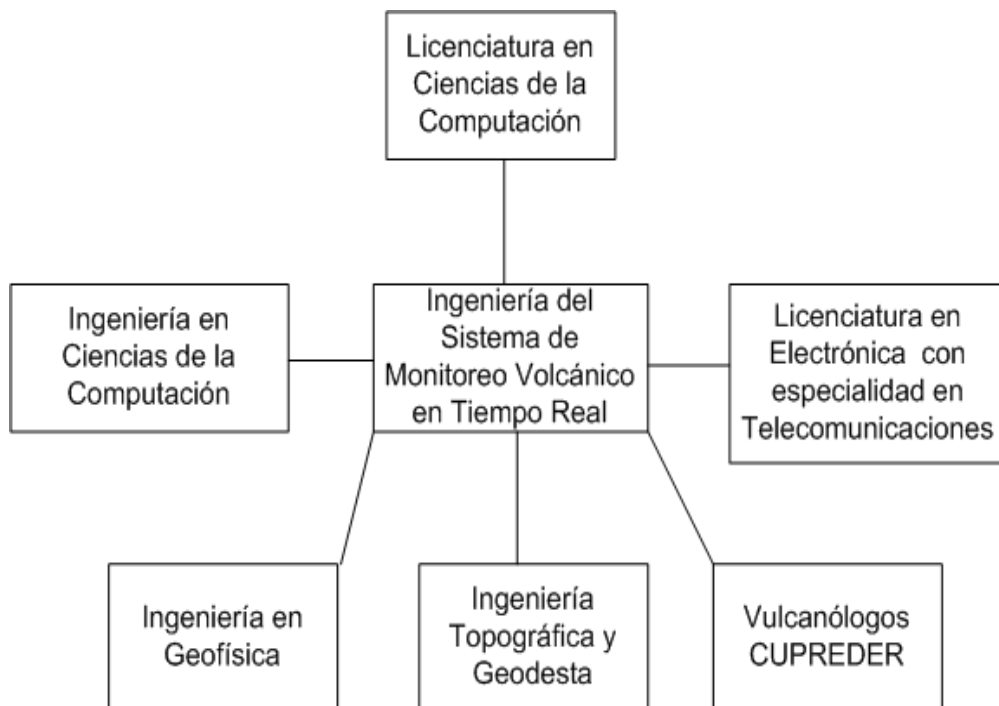


FIGURA 2. RELACIÓN INTERDISCIPLINARIA EN LA ING. DE SISTEMAS DEL PROYECTO EN LA BUAP.

Las fases del desarrollo inicial de la ingeniería de sistemas utilizado para modelar el Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real, requirió la intergración de varias disciplinas ya que es un proyecto en conjunto con áreas como la Licenciatura e Ingeniería en Ciencias de la Computación, la Licenciatura en Ciencias de la Electrónica con especialidad en Telecomunicaciones, la Ingeniería Geofísica, la Ingeniería Topográfica y Geodesta además de la interacción directa con vulcanólogos y geólogos del CUPREDER de la BUAP.

Para el desarrollo de la ingeniería de sistemas del proyecto, se necesitó utilizar inicialmente un Marco de Producción de los Sistemas de Información. Existen varios modelos dentro del proceso de ingeniería de sistemas como preparación a un marco de referencia i.e. El modelo de ciclo en “V” y el modelo de ciclo en “Y” y dentro del diseño del Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real, se optó por el modelo de ciclo en “Y” como se muestra a continuación en la (Figura 3) [13, 5].

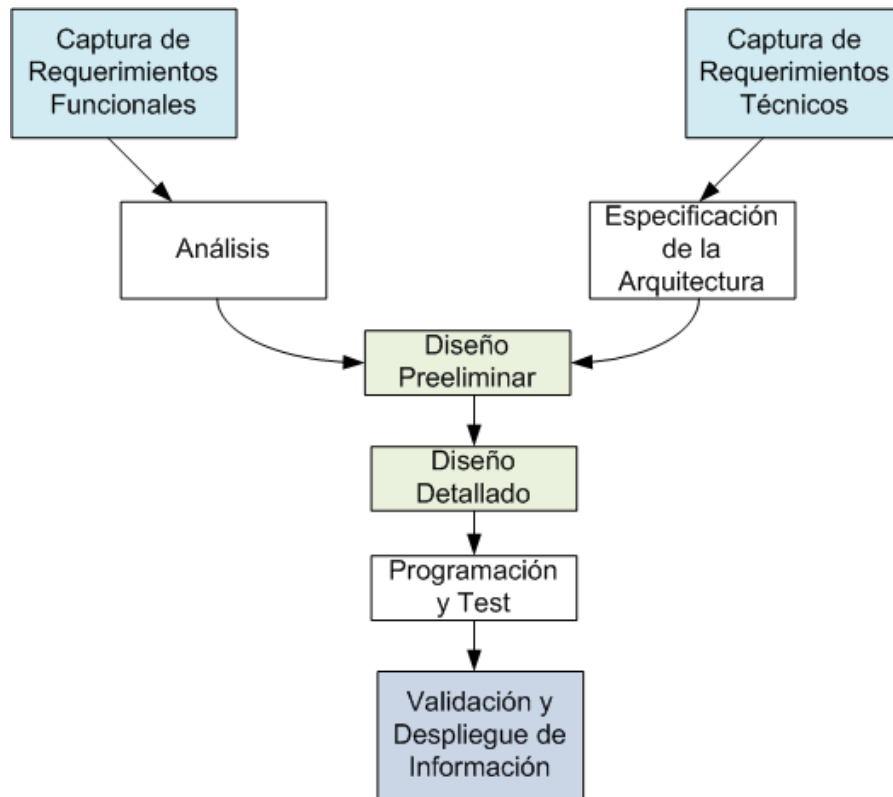


FIGURA 3. MARCO DE REFERENCIA, CICLO EN Y.

En la rama funcional izquierda del ciclo en “Y” se encuentra la captura de requerimientos funcionales y no funcionales del Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real y su posterior

análisis según el nivel de exigencia y las características necesarias en la calidad del software para la realización del mismo. Dentro de la rama funcional derecha del ciclo en “Y” se encuentra la captura de requerimientos técnicos necesarios para el funcionamiento de todo el proyecto de ingeniería que son mostrados en el diseño de la arquitectura general y comprende los requerimientos en los dispositivos electrónicos, físicos y de comunicación necesarios para el funcionamiento del sistema. En la especificación de la arquitectura muestra los detalles de los dispositivos a utilizar y que serán utilizados durante la implementación real del sistema. Una vez que ambas ramas se intersectan, se procede al diseño del software de manera preeliminar y detallada siguiendo una metodología determinada. El diseño del software interactúa directamente con ambas ramas de requerimientos; una vez diseñado, se programa el software y se realizan las pruebas correspondientes.

3.2 DISEÑO DEL SOFTWARE

El sistema computarizado fue diseñado para monitorear la información magnética del volcán Popocatepetl recibida en tiempo real, utilizando herramientas de última generación. La metodología de ingeniería de software utilizada para desarrollar el sistema fue SA-RT (*Structured Analysis for Real-Time*) [6, 16, 18], que nos proporciona una visión coherente y estructurada sobre el desarrollo de sistemas de tiempo real, así como la implementación del lenguaje formal LACATRE (*Langage d’Aide à la Conception d’Applications en Temps Réel*) [7, 15, 19] para comprender fácilmente la estructura del programa desarrollado para efectuar el monitoreo volcánico. Estas metodologías se utilizaron para acentuar la calidad en el diseño del sistema.

3.3 SA-RT

La metodología de Análisis y de Diseño de Sistemas SADT (*Structured Analysis Design Technichs*) propuesta por D.T. Ross, [6] en 1976 evoluciona a la metodología de Diseño Estático de Software SA (*Structured Analysis*) propuesta por Youdron/Pirbhai, [6] en 1986 y posteriormente se convierte en la metodología de Diseño Dinámico de Software de Sistemas de Tiempo Real SA-RT propuesto por Ward/Mellor en 1985 y por Hatley/Pirbhai en 1986 [6]. El objetivo de la metodología SA-RT es proporcionar un documento completo, de fácil lectura y de descripción de requerimientos y

necesidades del sistema de software. Es una herramienta de comunicación con un formalismo gráfico que facilita la interacción cliente-diseñador de software; también es una herramienta de expresión de los requerimientos y necesidades del sistema, del flujo de datos, de la arquitectura material, de las funciones, de eventos, es un lenguaje reactivo, es coherente y tiene propiedades de simulación [6].

A continuación se muestra la metodología SA-RT, utilizada para diseñar el Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real, con el diseño del Diagrama de Contexto del Sistema, el Diagrama de Flujo de Datos (DFD), el Diagrama de Estado Transición, el Diagrama de Contexto de la Arquitectura del Sistema y el Diagrama de Interconexión. Para el diseño del Software se utilizó el modelado mediante el lenguaje formal LACATRE.

3.3.1 DIAGRAMA DE CONTEXTO DEL SISTEMA

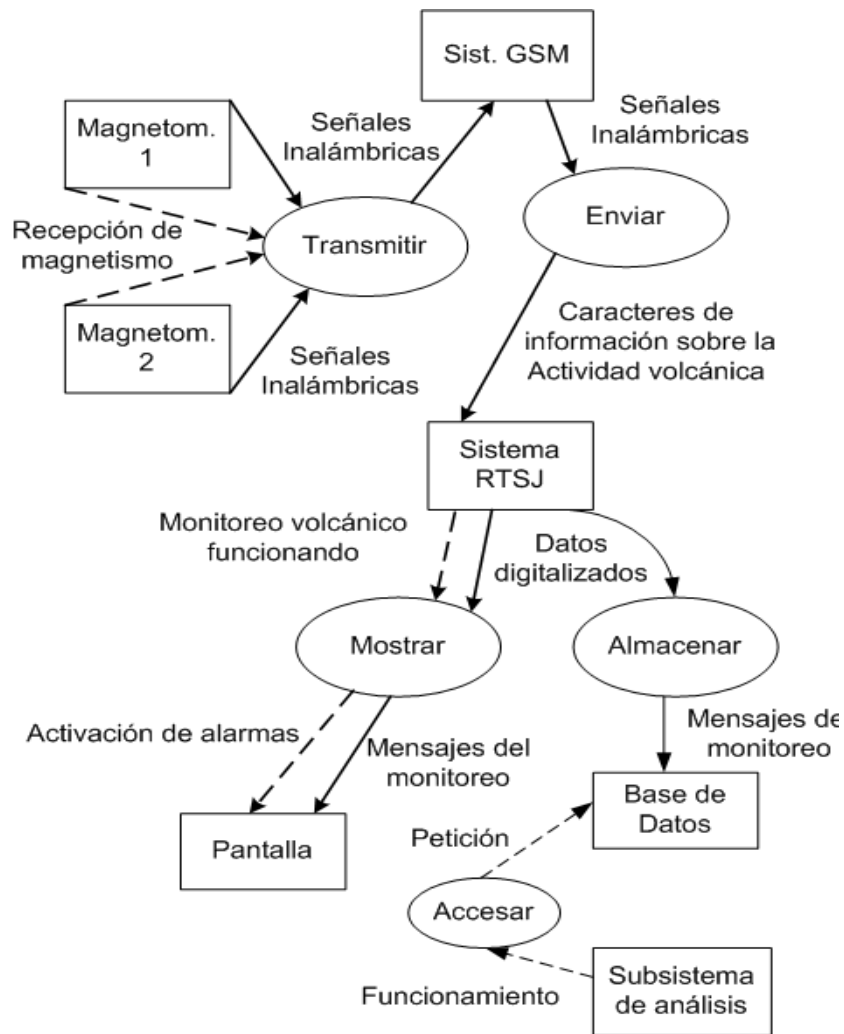


FIGURA 4. DIAGRAMA DE CONTEXTO DEL SISTEMA.

El objetivo de los magnetómetros es *transmitir* las señales magnéticas del volcán al sistema de monitoreo volcánico, éstos tendrán el evento *Recepción de magnetismo* proveniente de la actividad volcánica que envía señales inalámbricas al sistema de comunicación de datos a distancia y este a su vez, envía señales a las clases RTSJ. El sistema de monitoreo volcánico muestra la actividad actual del volcán Popocatépetl de una manera automatizada, que contiene funciones para visualizar la información en Pantalla. También se visualizan las alarmas en caso de registrar alguna actividad anormal. La información magnética se obtiene con vulcanólogos del CUPREDER. Los datos son guardados en una Base de Datos y por medio del subsistema de análisis, los vulcanólogos acceden a la información. (ver Figura 4).

3.3.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS

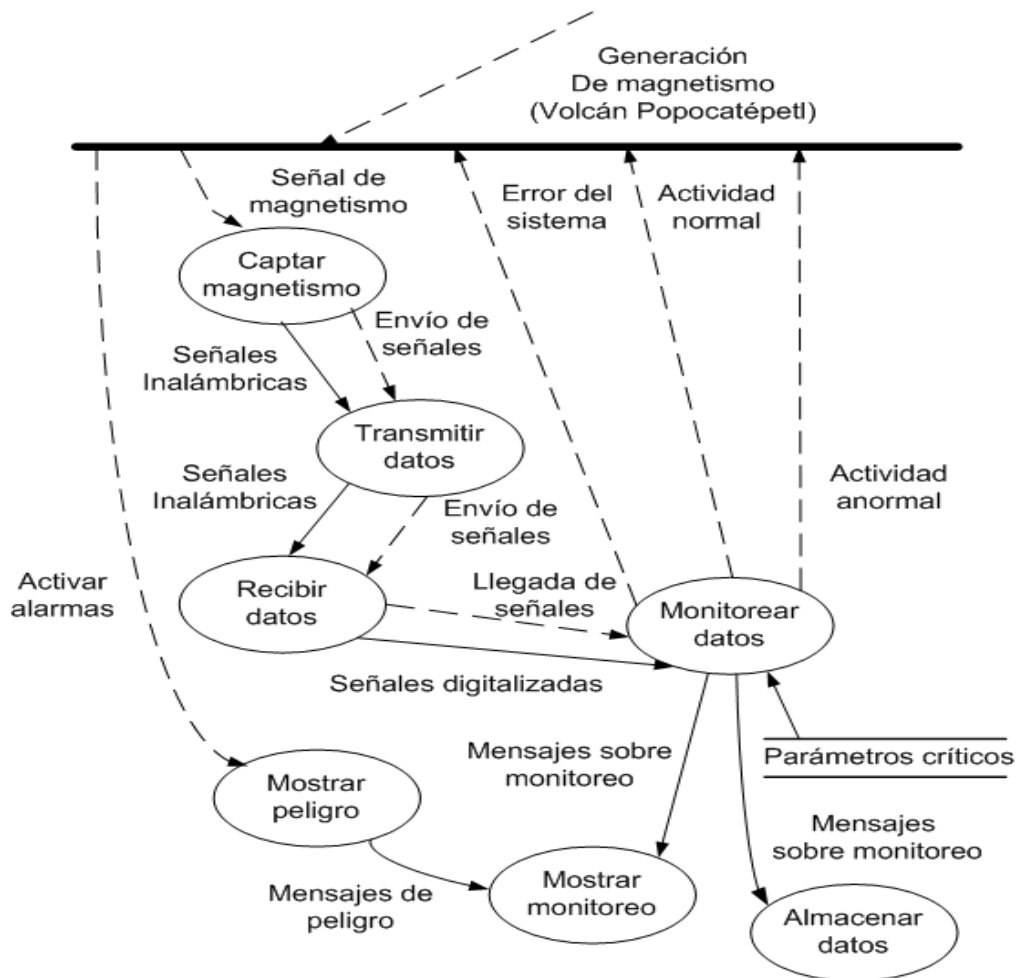


FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS (DFD) DEL SISTEMA.

En la Figura 5, están los procesos realizados del sistema así como los eventos que entran y salen de la barra de control. Además de los datos relacionados y transmitidos entre cada proceso. El almacenamiento de datos o *parámetros críticos*, permite hacer la comparación de la actividad magnética actual, y decide si corresponde a un estado normal o anormal dentro de la actividad volcánica.

3.3.3 DIAGRAMA DE ESTADO TRANSICIÓN

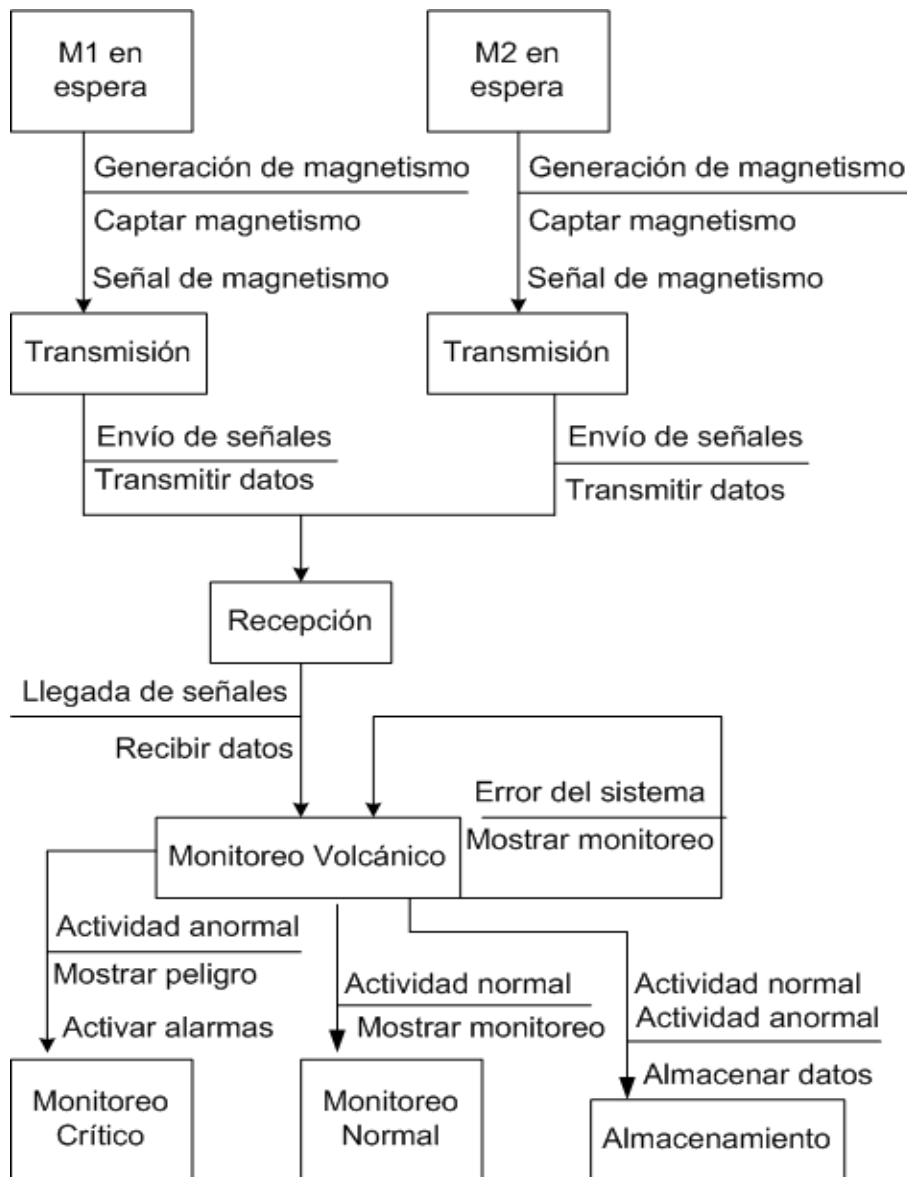


FIGURA 6. DIAGRAMA DE ESTADO-TRANSICIÓN DEL SISTEMA.

En la Figura 6 se muestran los estados del Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real y sus transiciones que derivan del DFD previo.

3.4 ARQUITECTURA MATERIAL

3.4.1 DIAGRAMA DE CONTEXTO DE LA ARQUITECTURA

La arquitectura del sistema está formada por una Interfaz Hombre-Máquina (IHM) que es utilizada por vulcanólogos. La entrada, son señales magnéticas inalámbricas transformadas en bits para su tratamiento dentro del sistema de monitoreo volcánico en tiempo real. El mantenimiento es realizado por un operador especializado en software o hardware y la salida de datos muestra el monitoreo en pantalla (ver Figura 7).

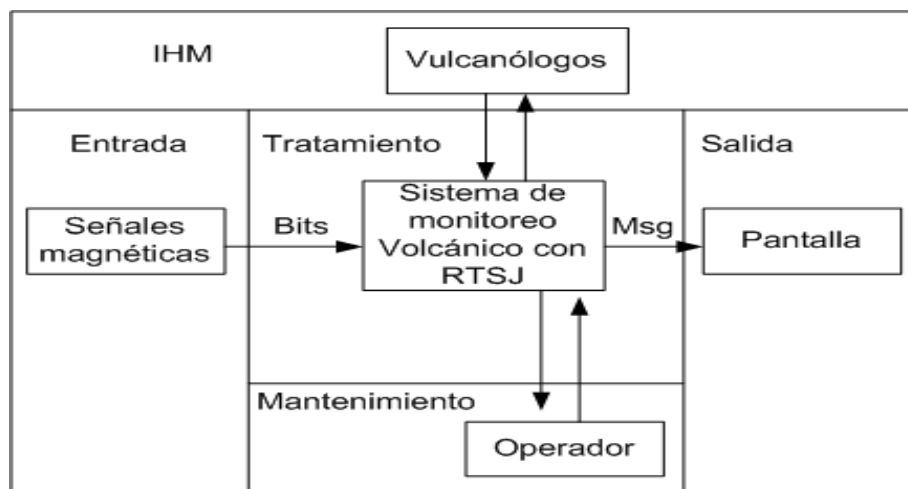


FIGURA 7. DIAGRAMA DE CONTEXTO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA

3.4.2 DIAGRAMA DE INTERCONEXIÓN

El magnetismo generado por el volcán Popocatepetl es medido por los magnetómetros con las unidades de medición del campo geomagnético, las nanoTeslas (nT) [14] que son percibidas como señales de entrada. Con la ayuda de un microcontrolador, una interfaz y una tarjeta diseñada para la

transmisión de los valores de los magnetómetros, las señales son enviadas de forma inalámbrica a una red GSM (GPRS). Las señales son transmitidas vía Internet a una PC con un Sistema Operativo LINUX compatible con RTSJ que recibirá las señales utilizadas en el Software del Sistema de Monitoreo Volcánico mediante mensajes para realizar todas las tareas del monitoreo, visualizadas en una pantalla plana (ver Figura 8).

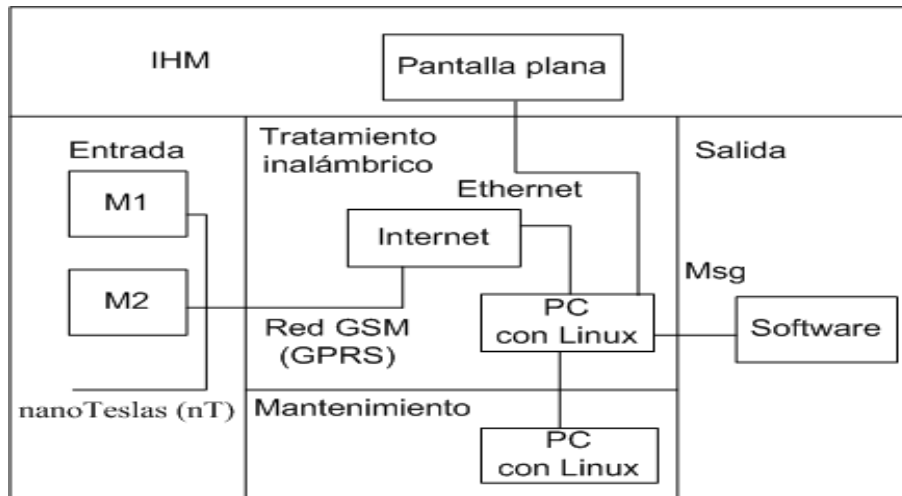


FIGURA 8. DIAGRAMA DE INTERCONEXIÓN DE HARDWARE

3.5 LACATRE

El diseño del software está representado mediante el lenguaje formal gráfico *LACATRE* para representar las aplicaciones desarrolladas en tiempo real, y facilitar el diseño del sistema. (ver Fig. 7). El programa fuente se divide en diferentes módulos; la función principal P1, *main ()* trabajará directamente con los hilos (*Threads*) siguientes:

- P1: MAIN ()
- P2: MAGNETOMETRO_1, con prioridad 1.
- P3: MAGNETOMETRO_2, con prioridad 2.
- P4: MONITOREO, con prioridad 3.
- P5: ALARMA, con prioridad 4.
- P6: PREDICE, con prioridad 5.

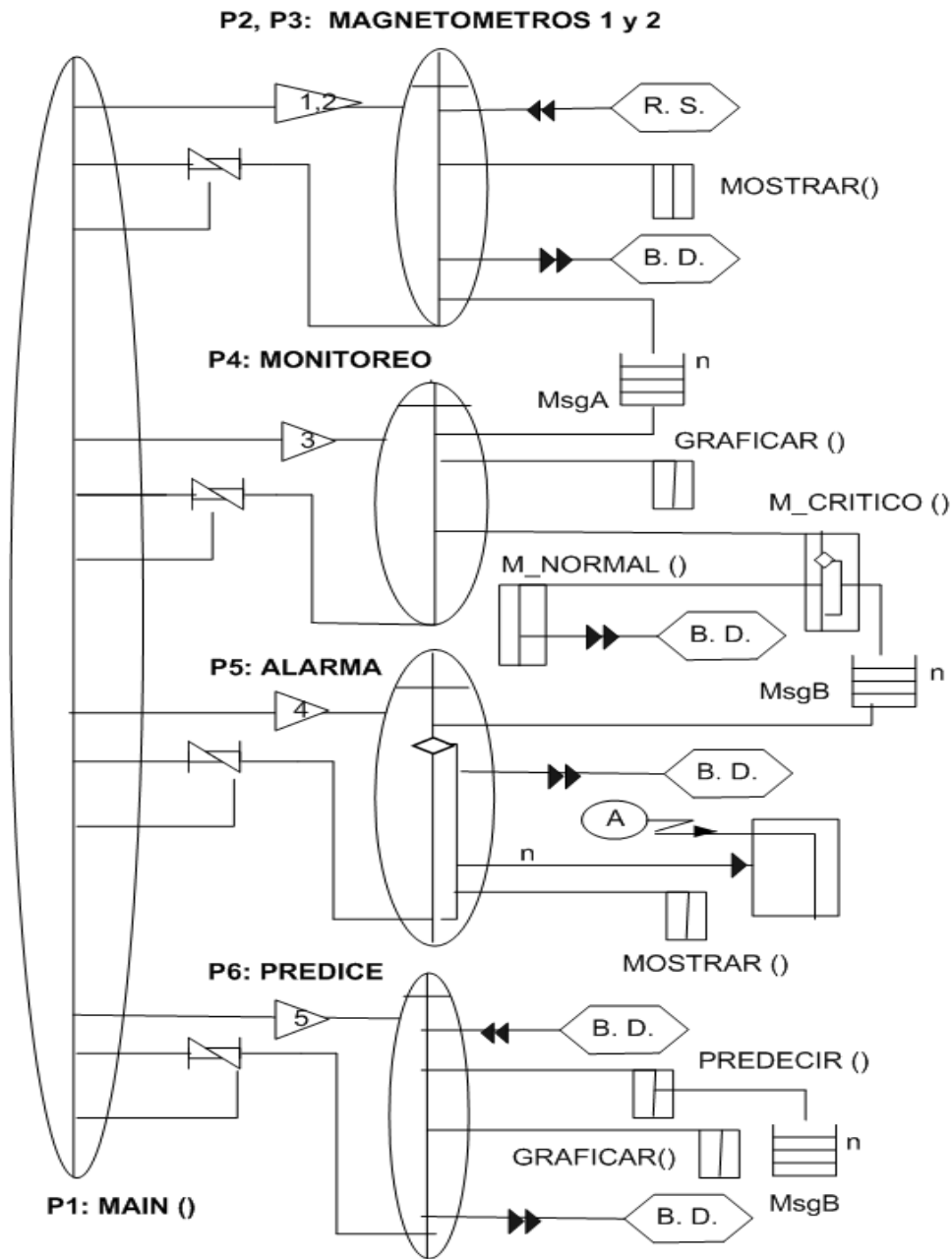


FIGURA 9. DIAGRAMA LACATRE

Todos los hilos están sincronizados mediante semáforos para asegurar que todos los procesos estén sincronizados y con los datos correctos. Las señales provenientes de los magnetómetros son digitalizadas y obtenidas mediante un protocolo de comunicación de datos, y son transmitidas mediante un Recurso de Datos (*R.S.*) a los hilos *P2* y *P3*. En la actividad actual se muestra el llamado de la función *MOSTRAR ()* que contiene los procedimientos para mostrar los datos numéricos en pantalla. Posteriormente los datos numéricos se escriben en una Base de Datos (*B.D.*) y los mensajes de cada

magnetómetro se envían a estructuras de datos de tipo FIFO de tamaño n , $MsgA$ de manera independiente. Estos mensajes son transmitidos al hilo $P4$ quién inicia el monitoreo de la actividad mediante el llamado a las funciones: $GRAFICAR()$, $M_CRITICO()$ y $M_NORMAL()$. Estas funciones contienen la información magnética del volcán, se actualiza en un tiempo determinado, y se almacena en la B.D.

Si existe una actividad anormal, la función $M_CRITICO()$, envía un mensaje a otra estructura de datos FIFO llamado $MsgB$ que contiene el tipo de anomalía y su grado de peligro. Los mensajes de $MsgB$ son transmitidos al hilo $P5$, que escribe un informe del problema en la Base de Datos y posteriormente se activa una alarma dependiendo del tipo de severidad del problema. Esto se mide mediante el tipo de datos n proveniente de $MsgB$. La función $GRAFICAR()$ muestra un mensaje de la actividad anormal en pantalla mediante el llamado de la función $MOSTRAR()$.

El sistema también cuenta con un proceso $P6$ llamado $PREDICE$ que tiene acceso a la Base de Datos y a la función $PREDECIR()$. Esta función hace una predicción de la actividad magnética del volcán usando algoritmos de redes neuronales [8, 11]. En caso de un evento anormal, se enviará un mensaje a $MsgB$ y activará otro tipo de alarma para prevenir sobre un posible evento anormal o una catástrofe.

3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El proceso principal $P1: MAIN()$ está representado dentro de la clase principal llamada $RecepcionMAGNET$ y dentro de él se encuentran los demás procesos como se muestra a continuación:

```
public class RecepcionMAGNET
{
    public static void main(String [] args)
    {
        int dato1, dato2;
        ...
    }
}
```

Dentro del proceso principal se ejecutan y se mandan a llamar los objetos de las otras clases y se

controla todo el flujo de datos del sistema. El proceso principal controla los objetos de los procesos *P2*, *P3*, *P4*, *P5* y *P6*. Los procesos *P2* y *P2* son la representación en software de los magnetómetros físicos, las señales enviadas físicamente serán recibidas por medio de una interfaz por estos dos procesos. Así mismo controlan la información enviada y recibida en Tiempo Real mediante periodos de tiempo determinados heredando la clase *RealtimeThread* de RTSJ. La clase que representa los magnetómetros físicos se llama *Magnetometro* y se muestra a continuación:

```
class Magnetometro extends RealtimeThread
{
    int valor;
    public Magnetometro(){ }
        //Método que genera las señales
    public void genera()
    {
        Random rng= new Random();
        valor = rng.nextInt(100);
    }
    ....
}
```

Los valores numéricos que son recibidos mediante las señales inalámbricas o Recurso de Datos (*R.S.*) son simulados dentro del programa con números aleatorios generados dentro de la clase *Random* y su respectivo objeto creado para manipular los datos: `Random rng = new Random();`. La estructura del método *run ()* para ejecutar hilos dentro de Java también es incluido dentro de esta clase y manda a llamar al método *genera ()* quién se encarga de generar los números aleatorios para estos los procesos *P2* y *P3*. La generación de números aleatorios con el método *genera ()* se encuentra dentro de un ciclo infinito que genera números indefinidamente, simulando la generación de magnetismo en la actividad volcánica del volcán Popocatépetl.

```
public void run()
{
    while(true)
    {
        genera();
        try{
```

```

        sleep(2000);
    }catch(InterruptedExcepcion e){}
}
}

```

Los procesos *P1* y *P2* están representados mediante objetos de la clase *RealtimeThread* en el método *main ()* de la clase principal *RecepcionMAGNET*. Estos objetos son hilos *thread* que tienen una prioridad mayor de 1 y 2 ya que son los elementos que van proporcionar la información necesaria para realizar el monitoreo volcánico. Esta prioridad se establece para cada hilo de forma diferente con los siguientes métodos y los parametros de tiempo necesarios para que sean ejecutados en Tiempo Real. A continuación se muestran los parámetros para el primer hilo con una variación en el tiempo, ya que primero se ejecuta el objeto del primer magnetómetro y posteriormente el segundo, sincronizados con una diferencia de tiempo mediante la clase *RelativeTime*:

```

//////////-----Parámetros del HILO 1-----////////

```

```

//Hay prioridad del nuevo hilo con: min+10
    int pri = PriorityScheduler.instance().getMinPriority() + 10;
//Objeto de prioridad en los parámetros
    PriorityParameters prip = new PriorityParameters(pri);
/* periodo de: 20milisegundos, 0 nanosegundos */
    RelativeTime period = new RelativeTime(20 /* ms */,0 /* ns */);
//libera los parámetros para el hilo periódico
    PeriodicParameters perp = new PeriodicParameters(null,
                                                    period,
                                                    null,
                                                    null,
                                                    null,
                                                    null);
...

```

A continuación se muestran los parámetros para el segundo hilo con una variación en el tiempo, de igual forma con un objeto de la clase *RelativeTime*:

```

//////////-----Parámetros del HILO 2-----////////

```

```

        int pri2 = PriorityScheduler.instance().getMinPriority() + 10;
//objeto de prioridad 2 en los parámetros
        PriorityParameters prip2 = new PriorityParameters(pri2);
/* periodo de: 200milisegundos, 0 nanosegundos */
        RelativeTime period2 = new RelativeTime(200 /* ms */,0 /* ns */);
//libera los parámetros para el hilo periódico
        PeriodicParameters perp2 = new PeriodicParameters(null,
                period,
                null,
                null,
                null,
                null);
...

```

Una vez que las prioridades iniciales fueron establecidas, el método *run ()* de cada hilo es implementado. Dentro de este método se genera el primer hilo en tiempo real mediante la clase *RealtimeThread* con un primer objeto llamado *rt* de la siguiente manera: `RealtimeThread rt = new RealtimeThread(prip, perp)`. El método *run ()* del primer hilo se muestra a continuación:

```

//run del primer hilo de prioridad 'n' ...
RealtimeThread rt= new RealtimeThread(prip, perp){
    public void run()
    {
        int n = 1;
        int valorM1=10;
        Magnetometro M1 = new Magnetometro();
        M1.start(); //hilo del primer magnetometro
        while (waitForNextPeriod() && (n<100))
        {
            //monitoreo del primer magnetometro
            valorM1 = M1.regresa();
            System.out.println("\n\n          MAGNETOMETRO 1 -----> "+valorM1);
            memoria bd = new memoria();
            bd.almacenar(valorM1);
            bd.imprime();
            bd.escribe(valorM1);
        }
    }
}

```

```

        n++;
    }
}
};

```

Ya dentro del método *run ()*, se declaran las variables locales útiles para el mismo método, y se declara un objeto *M1* de la clase *Magnetometro* que va a ser útil para la recuperación de los datos numéricos para mostrarlos en el programa representando a la la función *MOSTRAR ()* dentro del diagrama LACATRE, mediante un valor numérico de tipo entero asignado a la variable *valorM1 = M1.regresa()*; y posteriormente almacenarlos en la Base de Datos (*B.D.*) con las funciones *bd.almacenar(valorM1)*;, *bd.imprime()*;, y *bd.escribe(valorM1)*. El objeto *M1* declarado dentro del método *run ()* es un hilo que se va a estar ejecutando de manera anidada a la hora de ejecutarse el hilo en tiempo real *rt*, De manera similar el método *run()* para el segundo magnetómetro es implementado con una variación de prioridad definida previamente con la clase *RelativeTime*:

```

//run del segndo hilo n+1.....
RealtimeType rt2 = new RealtimeType(prip2, perp2){
    public void run()
    {
        int n=1;
        int valorM2=18;
        Magnetometro M2 = new Magnetometro();
        M2.start(); //hilo del segundo magnetometro
        while (waitForNextPeriod() && (n<100))
        {
            //monitoreo del segundo magnetometro
            valorM2 = M2.regresa();
            System.out.println("\n\n      MAGNETOMETRO 2 ----->> "+valorM2);
            memoria bd = new memoria();
            bd.almacenar2(valorM2);
            bd.imprime2();
            bd.escribe2(valorM2);

            n++;
        }
    }
}

```

```
};
```

La implementación del *run ()* del segundo magnetómetro mediante el objeto *rt2* es similar al primero, la única diferencia es el cambio de prioridad, ya que tiene una mayor prioridad el primero. Los hilos que representan a los magnetómetros y a los procesos *P2* y *P3* son los objetos *rt* y *rt2* y se ejecutan de manera cíclica como se muestra a continuación:

```
AsyncEventHandler handler = new AsyncEventHandler() {
    public void handleAsyncEvent(){
        ...
        /* prioridad y definición de los métodos run () para ambos magnetómetros*/
        ...

        rt.start(); //RUN DEL PRIMER PROCESO: P2 MAGNETÓMETRO 1
        rt2.start(); //RUN DEL SEGUNDO PROCESO: P3 MAGNETÓMETRO 2

        System.out.println("recibiendo señales....");
    } //handleAsyncEvent()
}; // AsyncEventHandler handler = new AsyncEventHandler()
```

El proceso *P4* dentro del diagrama LACATRE corresponde al tercer proceso, el de *MONITOREO*. El proceso tiene que ver con el periodo de tiempo en Tiempo Real que se utiliza para monitorear las señales que provienen de los magnetómetros. Se utiliza la clase *PeriodicTimer* con un objeto llamado *timer* que utiliza la clase *RelativeTime* para medir el tiempo del monitoreo con exactitud de nano segundos con alta resolución. Este a su vez está relacionado con el método *GRAFICAR ()*, que muestra en pantalla el resultado del monitoreo, y se ejecuta mediante otro programa de interfaz de usuario.

```
...
PeriodicTimer timer = new PeriodicTimer(
    null, // Start now..
    new RelativeTime(1500, 0), // monitoreo de señales cada 1.5 seg
    handler);

timer.start(); //Run del proceso: P4 MONITOREO
...
```

```

try{
    Thread.sleep(2000); // Run for 20 seconds
} catch(Exception e){}

```

...

El almacenamiento de los datos se realiza mediante la Base de Datos (*B.D.*) y todos los procesos tienen acceso a ella. La Base de Datos está representada por varias clases e interactúa directamente con la función *graficar ()* para monitorear la actividad magnética, e ir visualizando las variaciones magnéticas almacenadas en la B.D. Dentro de esta Base de Datos los procesos acceden a ella para escribir datos, actualizar datos y leer datos almacenados previamente para realizar alguna función en específica, ya sea para el análisis de los datos por medio de los especialistas o para su manipulación dentro del programa.

Se tienen dos señales que provienen de los magnetómetros y que son independientes, por lo que se creó la clase *señal* implementada con métodos que almacenan las señales enteras.

```

class señal
{
    public int vM1,vM2;
    public señal() {}
    public void almacenaseñal(int a,int b)
    {
        vM1=a;
        vM2=b;
    }
    public void almacenaseñal(int ax)
    {
        vM1=ax;
    }

    public void almacenaseñal2(int bx)
    {
        vM2=bx;
    }
}

```

Los objetos de esta clase serán necesarios para la clase *memoria* implementada posteriormente y que trabaja directamente con la Base de Datos. En una primera instancia, los datos son almacenados en Estructuras de Datos de la clase Vector incluida en Java y obtener los datos de una manera inmediata como se muestra a continuación:

```
class memoria
{
int valor;
PrintWriter outputStream=null;
    Vector memoria = new Vector(100);
    Vector memoria2 = new Vector(100);
    señal aux= new señal();
    public memoria(){ }
// metodos que almacenan las señales en memoria
    public void almacenar(int valor1,int valor2)
    {
        señal datos= new señal();
        datos.almacenaseñal(valor1,valor2);
        memoria.addElement(datos);
    }
    ...
}
```

Los datos son almacenados inicialmente en los vectores de manera temporal para mostrar los datos inmediatos al usuario final, representados con la función *mostrar ()* en el diagrama LACATRE y posteriormente se almacenan en un dispositivo de almacenamiento mayor. Esto se realiza gracias a los métodos *escribe()* y *escribe2()* y en una primera instancia, con el sistema de archivos de texto implementados en Java, como se muestra a continuación:

```
public void escribe(int señalM1)
{
    try{
        outputStream=new PrintWriter(new FileOutputStream("vmag1.txt"));
    }
    catch(FileNotFoundException e){
```

```
                System.out.println("Error al abrir el archivo");
                System.exit(0);
            }
        outputStream.println(señalM1);
        outputStream.close();
    }

public void escribe2(int señalM2)
{
    try{
        outputStream=new PrintWriter(new FileOutputStream("vmag2.txt"));
    }
    catch(FileNotFoundException e){
        System.out.println("Error al abrir el archivo");
        System.exit(0);
    }
    outputStream.println(señalM2);
    outputStream.close();
}
```

CAPÍTULO 4

PROPUESTA PARA PREDECIR EVENTOS EN EL SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL BASADO EN LA INFORMÁTICA BIO-INSPIRADA Y ALGORITMOS DE REDES NEURONALES.

4.1 INFORMÁTICA BIO-INSPIRADA

Una rama de las Ciencias de la Computación se encarga de estudiar el tratamiento racional de la información a través de máquinas automatizadas que ayudan al desarrollo del conocimiento y su comunicación. Mediante la observación podemos encontrar diversos sistemas cognitivos capaces de manipular los símbolos a nuestro alrededor; estos sistemas pertenecen en la mayor parte al Reino Natural y ejemplos de ellos son el cerebro, el sistema nervioso central, la evolución natural de las especies a través de los códigos genéticos, el sistema inmunitario, los sistemas sociales y algunos sistemas psico-químicos. El Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real aplica los conceptos de la informática bio-inspirada mediante los algoritmos de redes neuronales para predecir eventos dentro del proceso *P6 PREDICE* y su función *PREDECIR()*.

En nuestro entorno, existen una gran diversidad de problemas complejos que se resuelven mediante la descomposición de los problemas en subproblemas sin importar que dicha descomposición nos puede llevar a un tiempo de resolución demasiado grande, con una complejidad *NP-Difficiles* [4], pero un problema complejo no se puede descomponer sin perder la naturaleza del mismo problema mediante su característica unitaria; un mismo tipo de problema puede ser tratado de una manera complicada o de una manera compleja teniendo en cuenta que su solución es complicada como lo es el problema computacional del “*agente de viajero*”.

La complejidad en los sistemas agrupa un gran número de entradas de diversos elementos que son ligados mediante diversas interacciones cicladas y/o recurrentes y el comportamiento de sus diferentes componentes son interdependientes y existen propiedades globales emergentes (propiedades de un sistema que presenta características novedosas relacionadas con las propiedades y características

de otro tipo de sistema) que no siempre son visibles, dependiendo del tipo de sistema.

Los sistemas inspirados en la biología nos pueden ayudar a construir algoritmos más eficaces que nos ayudan a resolver problemas complejos, dentro de una de las ramas de la Inteligencia Artificial. La informática bio-inspirada nos permite la construcción de sistemas artificiales (Hardware o Software) que reproducen algunos aspectos de la inteligencia humana o animal y la construcción de sistemas artificiales capaces de ayudar a resolver o reemplazar tareas humanas que necesiten de inteligencia. A través de la historia, la informática bio-inspirada ha ido evolucionando, desde el desarrollo de artefactos mecánicos, el desarrollo de la cibernética, el razonamiento lógico en base a modelos matemáticos, la representación del conocimiento, los sistemas expertos, los algoritmos de aprendizaje y el conocimiento perfeccionado gracias a la evolución del ser humano y su entorno. El conocimiento se convierte en un nuevo paradigma que reemplaza la metáfora del cerebro-ordenador y guía los sistemas inteligentes hacia la resolución de los problemas de una manera cognitiva, ya sea interactuando con su medio ambiente y/o con un comportamiento adaptativo elemental al medio. Para algunos ingenieros resulta más eficaz inspirarse de los organismos vivos y de la propia introspección humana, de esto derivan campos de estudio como el reconocimiento de patrones mediante redes neuronales *feed-forward*, el control de movimiento mediante redes neuronales recurrentes, la optimización mediante algoritmos genéticos, entre otros.

4.2 LA INFORMÁTICA TRADICIONAL Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Según la informática tradicional, se definen programas específicos para resolver algún problema determinado mediante el uso de algoritmos de resolución y de conceptos matemáticos. Pero dentro de la informática ligada a la Inteligencia Artificial un programa genérico manipula los datos que contienen la solución de algún problema dado; en el caso de la Inteligencia Artificial *clásica* existen sistemas como los motores de inferencias y los Sistemas Expertos, mediante una base de reglas y de conocimiento.

Dentro de la informática bio-inspirada, a diferencia de la Inteligencia Artificial simbólica tradicional, los datos son subsimbólicos; la inspiración biológica que proporciona los algoritmos de exploración mediante: la aproximación funcional, la exploración parcialmente aleatoria, las redes neuronales (elasticidad sináptica), la secuencia genética (selección natural), los caminos de feromonas

(inspiración en las hormigas, termitas) y el sistema inmunitario (respuesta inmunitaria con anticuerpos) entre otros. En los algoritmos de redes neuronales, un mismo programa desarrollado puede ser aplicado a toda una clase de problemas sin modificar el código.

4.3 EL CEREBRO Y LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

El cerebro es uno de las cumbres de la evolución biológica, ya que es un gran procesador de información. Entre sus características podemos destacar, que es capaz de procesar a gran velocidad grandes cantidades de información procedentes de los sentidos, combinarla o compararla con la información almacenada y dar respuestas adecuadas. Además es de destacar su capacidad para aprender a representar la información necesaria para desarrollar tales habilidades, sin instrucciones explícitas para ello. El cerebro es un conjunto de millones y millones de unas células especiales, llamadas neuronas, interconectadas entre ellas por sinapsis.

Los científicos llevan años estudiándolo y se han desarrollado algunos modelos matemáticos que tratan de simular su comportamiento. Estos modelos se han basado sobre los estudios de las características esenciales de las neuronas y sus conexiones. Aunque estos modelos no son más que aproximaciones muy lejanas de las neuronas biológicas, son muy interesantes por su capacidad de aprender y asociar patrones parecidos lo que nos permite afrontar problemas de difícil solución con la programación tradicional. Se han implementado en computadoras y equipos especializados para ser simulados [9].

Con el paso de los años, los modelos de neuronas iniciales se han ido complicando, introduciendo nuevos conceptos llegando a ser un paradigma de computación (equivalente a las máquinas de Turing) basado en el comportamiento de las neuronas. El funcionamiento del cerebro humano es complejo, aunque se puede hacer un comparativo entre el funcionamiento del cerebro y el funcionamiento de las computadoras como se muestra a continuación en la Tabla IV [4]:

TABLA IV
COMPARACIÓN ENTRE EL CEREBRO Y LA COMPUTADORA

	COMPUTADORA	CEREBRO
Estructura y complejidad	Estructura Jerárquica, procesador secuencial.	10 ¹⁰ neuronas “equivalentes” 10 ⁴ sinapsis/neurona.
Velocidad	10 ⁴ operaciones específicas por segundo.	100 operaciones específicas por segundo y por neurona
Potencia de Cálculo	Una operación a la vez sobre 1 o 2 datos de talla reducida	10 ¹⁰ (al menos) operaciones a la vez sobre millones (al menos) de datos.

La *Tabla IV* muestra una breve comparación entre las operaciones que efectúa el cerebro humano y la computadora, como ejemplo podemos mencionar que para lograr una visión parecida a la que realiza el ser humano es necesario utilizar 1000 super computadoras, sin embargo la computadora memoriza detalles arbitrarios de una forma mucho más rápida. Para memorizar detalles que normalmente los humanos realizamos todos los días, el cerebro humano es capaz de hacerlo de una manera mucho más eficaz, a diferencia que las computadoras deben de ser programadas explícitamente para resolver un tipo de problema. El cerebro puede aprender de la experiencia.

La estructura paralela del cerebro ofrece muchas ventajas, ofrece “cálculos” paralelos muy intensos, tolerancia a los errores fuertes, tolerancia al ruido extremo, tiene degradación lenta del desempeño, generalización y extrapolación. La informática bio-inspirada ha tenido una evolución a través de la historia y el desarrollo de las redes neuronales ha sido de manera gradual, como se muestra en la *Tabla V* [4, 9].

TABLA V
HISTORIA Y MOTIVACIONES DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Año	MOTIVACIONES
1890	William James- Desarrollo de los principios fundamentales de la neurobiología.
1943	McCulloch, Pitts- Primeros modelos matemáticos.
1954	IBM Research- Primeras simulaciones.
1958	Frank Rosenbaltt- Desarrollo del Perceptrón.
1959	Widrow- Teoría sobre la adaptación neuronal y el Adaline (Adaptative Linear Neuron) y el Madaline (Multiple Adaline). Es la primera aplicación de las redes a problemas reales: filtros adaptativos para eliminar ecos en las líneas telefónicas.
1962	Roseblatt- El Perceptrón es un identificador de patrones ópticos binarios, y salida binaria. Dio lugar a regla de aprendizaje delta, que permitía emplear señales continuas de entrada y salida.
1969	Minsky, Papert- Limites teóricos del Perceptrón.
1977	Anderson- Los Modelos de memorias asociativas. Investiga el autoasociador lineal brain-state-in-a-box.
1982	Hopfield elabora un modelo de red consistente en unidades de proceso interconectadas que alcanzan mínimos energéticos, aplicando los principios de estabilidad desarrollados por Grossberg.
1984	Kohonen Mapas de Kohonen- Este investigador desarrolló redes basadas en aprendizaje competitivo, con una idea nueva basada en la biología: Las unidades de procesos físicamente adyacentes aprenderán a representar patrones de entrada similares, así las neuronas de salida adyacentes identifican patrones similares.
1985	Desarrollo de las Redes multi-capas y algoritmo de retropropagación.
1986	PDP Research Group- Acercamiento pluridisciplinario.
1986	Hinton, Sejnowski- La máquina de Boltzmann, una red que usa la probabilidad para encontrar mínimos totales.
1987	Kosko- los modelos BAM (Bi-directional Associative Memory.)
1987	Madurez, más de 500 obras publicadas sobre el tema, publicación de más de 20 revistas científicas especializadas.

Una red de neuronas artificiales es un conjunto de células lógicas que intercambian mensajes a través de un grafo de conexiones ponderadas con el objetivo de realizar una función de entrada y salida; los principios generales de las redes neuronales son inspirados directamente de la estructura del sistema nervioso del ser humano que incluye tres características fundamentales:

- Células (neuronas).
- Gráfo de conexiones (Dendritas, axones, sinapsis).
- Capacidad de memorización: Almacenamiento, recuperación, modificación a corto tiempo, modificación a largo tiempo de la información proporcionada o percibida.

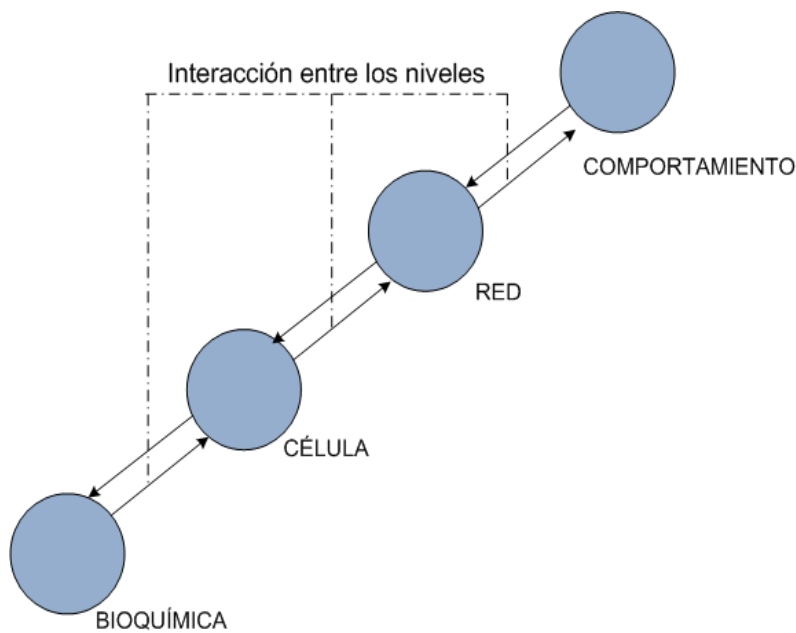


FIGURA 10. DIFERENTES NIVELES DE INTERACCIÓN EN LAS REDES NEURONALES

Existen diferentes niveles de interacción dentro del sistema de las redes neuronales, como se muestra en la (Figura 9). En el modelo biológico (Figura 10), estos niveles se caracterizan por estar relacionados para lograr el intercambio satisfactorio de información mediante una interacción compleja que da como resultado la *emergencia* de nueva información. Estos niveles se muestran a continuación [4]:

- *Nivel de bioquímica:* En él se concentra las corrientes iónicas, el flujo sanguíneo, los genes, los neuromoduladores y los neurotransmisores.

- *Nivel de célula:* En este nivel se concentra el potencial de la neurona como elemento fundamental, que contiene varios elementos con su respectiva potencialidad, como la membrana celular, el periodo refractario de la célula, el árbol dendrítico, etc.
- *Nivel de red:* El nivel de red se caracteriza por la conectividad, la modularización, la rapidez de transmisión e intercambio de mensajes entre las neuronas.
- *Nivel de comportamiento:* Este nivel está relacionado con la capacidad sensorial de las neuronas, así como la función que juegan las neuronas motoras al generar y transmitir los impulsos nerviosos que provocan la contracción muscular, la memoria, etc.

4.4 LA NEURONA BIOLÓGICA

La neurona como elemento central del sistema nervioso, tiene una funcionalidad elemental de tratamiento de la información para la transmisión de mensajes. La neurona es una célula muy específica ya que contiene un sistema complejo de señalización eléctrica y química y la rapidez de la transmisión de mensajes es elevada a través de una red de neuronas interconectadas. Sin embargo sólo representan el 10 % de la corteza cerebral ya que existen 10 veces más de células gliales.

La membrana de una neurona contiene una doble capa de fosfolípidos que tienen la característica de ser impermeables a los cambios iónicos intracelulares con los elementos K^+ y A^- y extracelulares con los elementos Na^+ y Cl^- . El diferencial eléctrico entre el medio intracelular y el medio extracelular es mantenido por los canales, las puertas y bombas de transmisión iónicas-específicas. El potencial de la membrana es el equilibrio ya que las corrientes iónicas se compensan, es decir las proteínas A^- se producen en la célula y no atraviesan la membrana. Los iones de Na^+ no pueden atravesar la membrana, sin embargo los iones de K^+ si lo pueden hacer y el intercambio de cargas iónicas-específicas es de 3 Na^+ contra 2 K^+ . Una neurona en reposo tiene el potencial eléctrico de -70 mV, pero dicho potencial puede variar ligeramente entre -40 mV a -90 mV y por debajo de -40 mV existe una modificación de comportamiento. El potencial de acción fluye de una forma muy estereotipada de tipo “todo o nada” con una propagación unidireccional a lo largo de todo el axon y de las dendritas y puede cambiar rápidamente de manera importante; tiene una duración de aproximadamente 1-2 mSeg con una amplitud de 100 mV y una frecuencia máxima de 200 hz; tiene también la capacidad de aumentar y descender bruscamente la amplitud entre +30 mV y -100 mV así

como el regreso progresivo hacia los -70 mV. El potencial de acción de una neurona biológica depende del flujo de Na^+ y de K^+ [4].

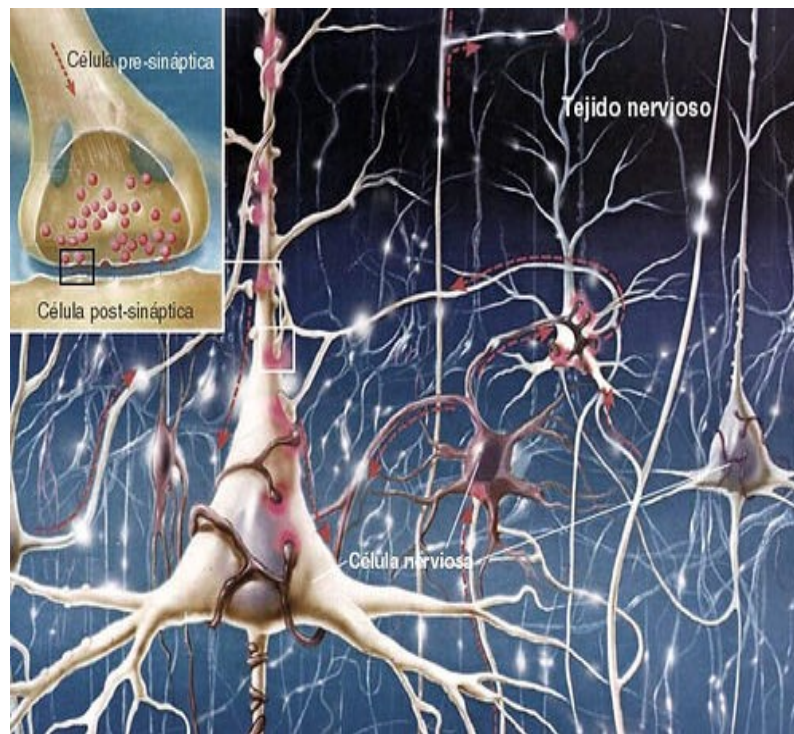


FIGURA 11. LA NEURONA BIOLÓGICA

4.5 LA SINAPSIS

Cada neurona desarrolla impulsos eléctricos que se transmiten a lo largo de los axones comunicados mediante ramificaciones axonales que se conectan con otras neuronas por sus dendritas. El conjunto de elementos que hay entre la ramificación axonal y la dendrita forman una conexión llamada sinapsis que regula la transmisión del impulso eléctrico mediante elementos bioquímicos y neurotransmisores que tienen efecto positivo o negativo sobre la transmisión del impulso eléctrico que la neurona recibe de las dendritas.

Los neurotransmisores tienen una influencia directa en el potencial de la neurona después de la sinapsis y su potencial positivo es de tipo EPSP (excitación despolarización) o bien negativo de tipo IPSP (postsináptica inhibitoria) que son integrados por la neurona post-sináptica con una integración espacial y temporal [4]. Si consideramos que la información en el cerebro está codificada como

impulsos eléctricos que se transmiten entre las neuronas y que los impulsos se ven modificados básicamente en las sinapsis cuando las señales son químicas podemos intuir que la codificación del aprendizaje estará en las sinapsis y en la forma que dejan pasar o inhiben las señales segregando neurotransmisores [9].

4.6 LA NEURONA ARTIFICIAL

Las neuronas artificiales son modelos que tratan de simular el comportamiento de las neuronas, una red Neuronal Artificial corresponde a una colección de Elementos Procesadores interconectados. Los pesos sinápticos o poder de las conexiones, se adaptan tal que la salida de la red ajusta una respuesta esperada, y contiene adaptación que es la capacidad para cambiar parámetros de algún sistema según una regla que minimiza el error. Estas características de procesamiento distribuido y adaptación son la marca de calidad de sistemas de procesamiento de información biológica [11]. Los modelos clásicos desarrollados en las neurociencias computacionales podemos destacar los de Hodkin-Huxley (HH), Integrate and Fire (I&F), Modelo Frecuencial [4].

Las neuronas son autómatas simples en donde la lógica de funcionamiento es independiente del estado de toda la red, tienen una topología de organización de conexiones intracelulares (i.e. Estructura de un grafo ponderado). Contiene leyes dinámicas con la evolución del estado de los autómatas y la evolución de las ponderaciones del grafo de conexiones.

Una neurona artificial es una función algebraica no lineal que tiene parámetros con valores limitados. Una neurona formal se representa de la siguiente manera (Fig 11) [4] y la ecuación de salida representada con la ecuación 1.1:

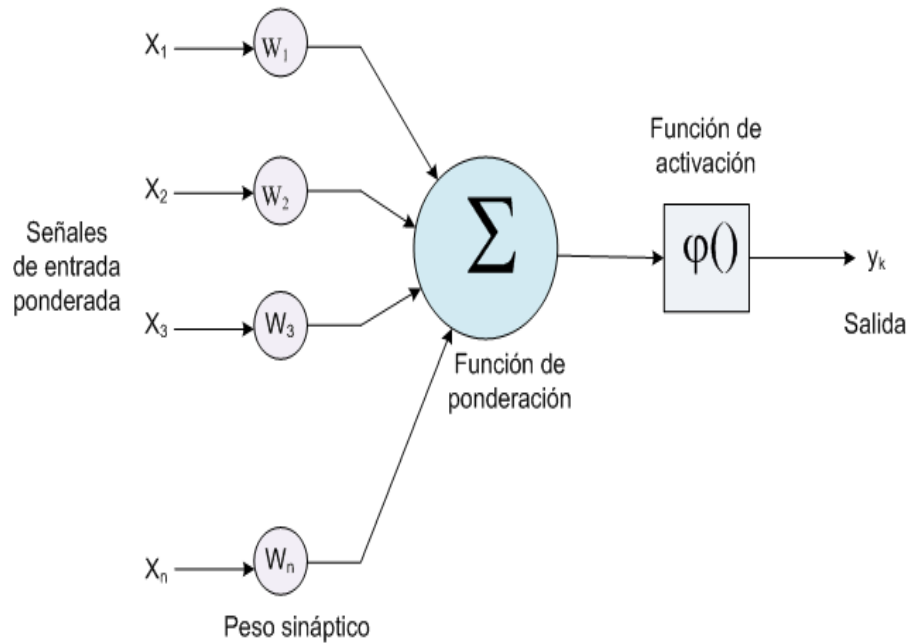


FIGURA 12. LA NEURONA FORMAL

$$Y_k = \varphi\left(\sum_1^n W_{ki} X_i + \theta_k\right) \quad (1.1)$$

Por las entradas X_i llegan unos valores que pueden ser enteros, reales o binarios. Estos valores equivalen a las señales que enviarían otras neuronas a la nuestra a través de las dendritas. Los pesos que hay en las sinapsis W_i , equivaldrían en la neurona biológica a los mecanismos que existen en las sinapsis para transmitir la señal. De forma que la unión de estos valores (X_i y W_i) equivalen a las señales químicas inhibitorias y excitadoras que se dan en las sinapsis y que inducen a la neurona a cambiar su comportamiento [9].

Estos valores son la entrada de la función de ponderación o red que convierte estos valores en uno solo llamado típicamente el potencial que en la neurona biológica equivaldría al total de las señales que le llegan a la neurona por sus dendritas. La función de ponderación suele ser una la suma ponderada de las entradas y los pesos sinápticos. La salida de función de ponderación llega a la función de activación que transforma este valor en otro en el dominio que trabajen las salidas de las neuronas[9]. La función de transferencia $\varphi()$ Es una función sigmoide (varias posibilidades, i.e. *Tanh*

en el intervalo $[-1, 1]$), derivada al origen con $a/4$ (normalmente $a = 1$) y es continua y derivable, dada por la ecuación 1.2:

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + \exp(-ax)} \quad (1.2)$$

Las redes neuronales biológicas son fundamentalmente irregulares ya que son algorímicamente inaccesibles, pero las redes neuronales artificiales son construidas a partir de grafos regulares; las redes neuronales irregulares son casos particulares de redes neuronales irregulares. Entonces, si $W_{ji} = 0$ consideramos que la conexión entre la neurona i y la neurona j es inexistente. Dentro de las redes neuronales podemos notar las redes feed-forward (Figura 13) con n' número de entradas finitas.

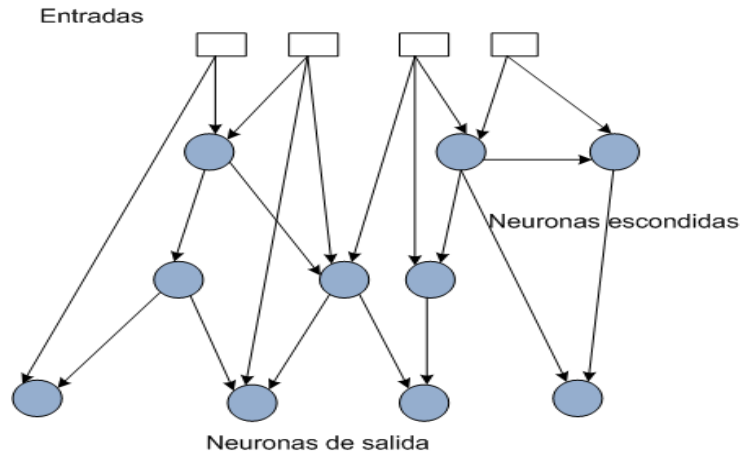


FIGURA 13. REDES FEED-FORWARD

Como segunda familia consideramos las redes en capas (Figura 14). Todo camino de entrada/salida es de longitud igual al número de capas de la red neuronal; podemos notar que el 95 % de las redes neuronales artificiales son de este tipo. Una tercera familia la constituyen las redes recurrentes que son más poderosas que las redes feed-forward, pero que son más complejas ya que son dinámicas con entradas y salidas complejas [4].

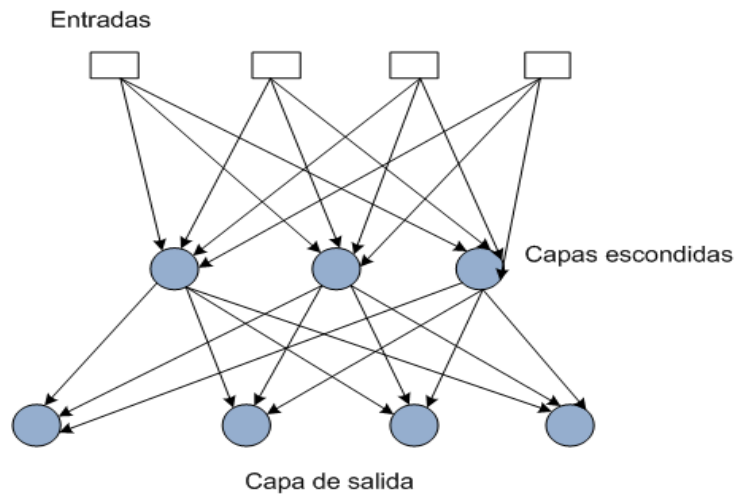


FIGURA 14. REDES EN CAPAS

4.7 PREDICCIÓN DE EVENTOS VOLCÁNICOS

El Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real contiene el módulo *P6: PREDICE* cuyo objetivo es realizar predicciones en el comportamiento del campo geomagnético del volcán Popocatepetl. El sistema muestra los eventos magnéticos que registran los magnetómetros y que son almacenados en una Base de Datos; Es posible diseñar modelos de predicción con algoritmos de aprendizaje para predecir eventos volcánicos utilizando la información almacenada durante un periodo de tiempo con los algoritmos de redes neuronales. Para ello las Redes Dinámicas y las Redes Recurrentes Retardadas en el Tiempo relacionadas mediante las memorias (*Gamma* y *Laguerre*) [11], son el mejor modelo para realizar el trabajo de predicción de fenómenos naturales.

Las topologías de Redes Dinámicas son una clase muy importante de Redes Neuronales ya que son hábiles para procesar varias señales en el tiempo [11]. Una red Neuronal Dinámica se crea a partir de una Red Neuronal Estática con un mecanismo de memoria extendida que es capaz de almacenar valores anteriores de los datos correspondientes a los valores de entrada [11]; la memoria es importante ya que permite decisiones con base en el comportamiento de la entrada en un periodo de tiempo. Un predictor estático hace decisiones con base solamente en la entrada actual, por lo que puede

desempeñar funciones que no involucran conocimiento sobre la historia de la señal de entrada [11].

Las Redes Recurrentes Retardadas en el Tiempo tienen como estructura de memoria los filtros lineales donde la memoria es una referencia de lo esperado en línea, o de lo almacenado en el pasado de la entrada. Las conexiones recurrentes se usan como memoria y son llamadas unidades de contexto [11]. Las Redes Recurrentes Retardadas en el Tiempo con capa de memoria restringida a la salida pueden representarse como un procesador de entrada [11]. Lo importante de este tipo de red es la representación de la información en el tiempo en vez de la información dada únicamente por los valores de entrada. Este tipo de redes utiliza la memoria Gamma, que se identifica como una estructura de conexiones en cascada recurrentes a ellas mismas, es una estructura de retroalimentación local que amplía la unidad de contexto con almacenamiento mucho más versátil [11]. Las Redes Recurrentes Retardadas en el Tiempo son la mejor opción para proponer un módulo de predicción en el Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real con el fin de prever alguna variación anormal en el campo geomagnético del volcán Popocatepetl y así evitar alguna catástrofe, con el fundamento de la informática bio-inspirada y las Redes Neuronales para construir sistemas complejos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR DE SOFTWARE DEL SISTEMA

Los primeros resultados durante la ejecución del programa en tiempo real en modo consola se muestra a continuación. En él se muestra la prioridad de los procesos mediante la sincronización de los magnetómetros, y la recepción activa de señales magnéticas mediante valores numéricos generados aleatoriamente, todo efectuado en Tiempo Real (Figura 15).

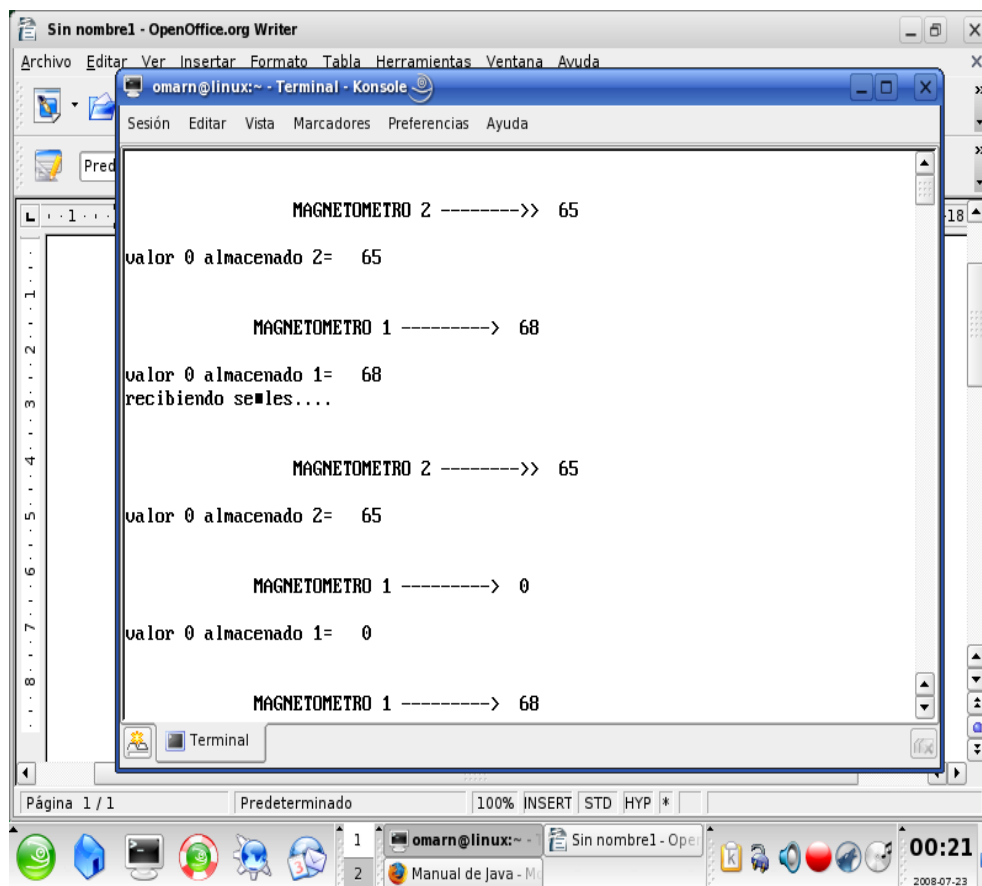


FIGURA 15. RESULTADOS NUMÉRICOS DE LOS MAGNETÓMETROS EN TIEMPO REAL

La parte gráfica mostrada en la Figura 16, presenta una visión más clara del monitoreo volcánico, así como una interfaz gráfica que facilita la comprensión del comportamiento en el fenómeno volcánico.

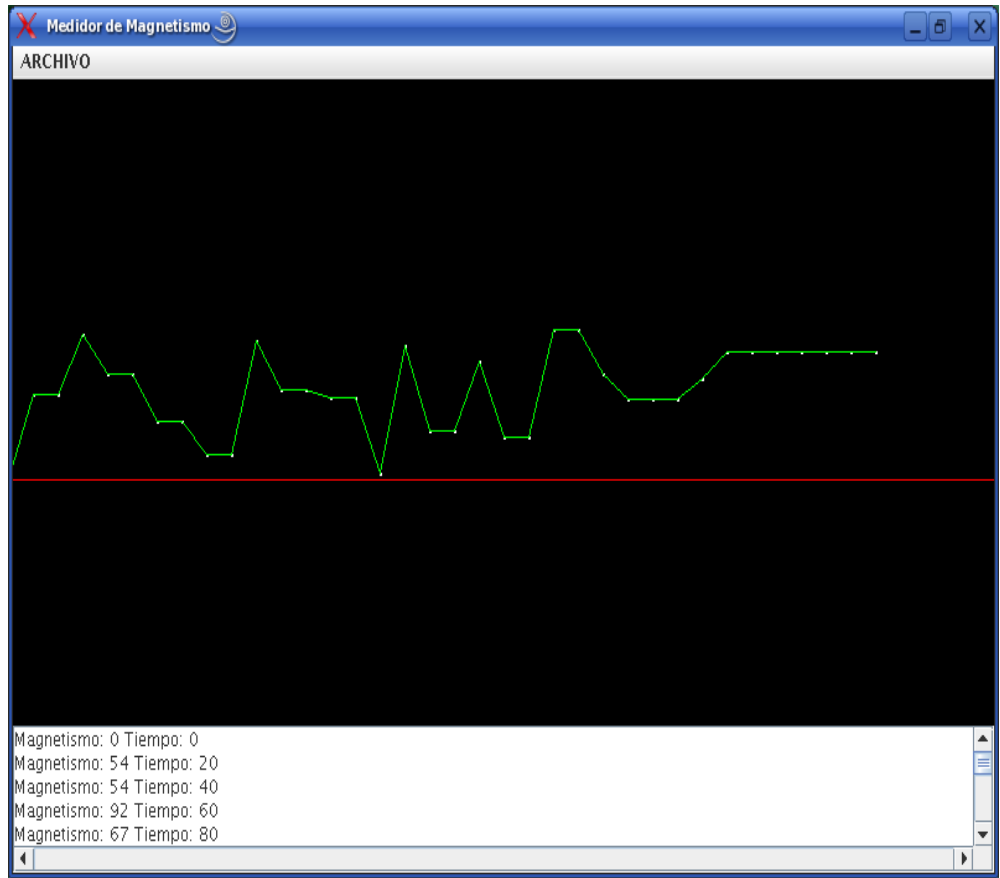


FIGURA 16. INTERFAZ Y RESULTADOS GRÁFICOS

Como primera versión, ambos programas son ejecutados al mismo tiempo y la implementación con Java RTSJ arroja números aleatorios que simulan las variaciones o anomalías en el campo magnético del volcán. Posteriormente otro programa en Java como interfaz de usuario lee y toma los valores arrojados en tiempo real, los grafica y muestra en pantalla (Figura 17, 18).

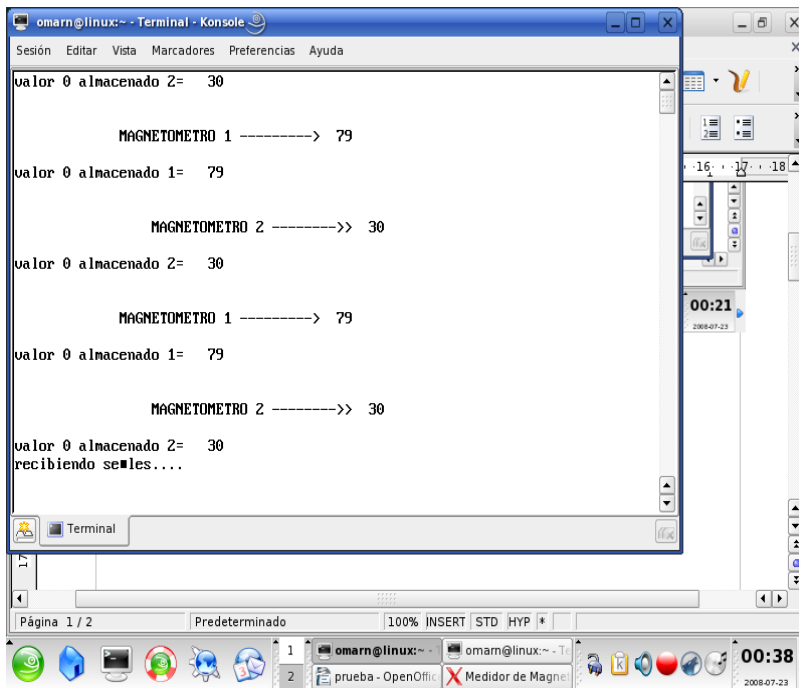


FIGURA 17. RESULTADOS NUMÉRICOS DE LOS MAGNETÓMETROS EN TIEMPO REAL 2

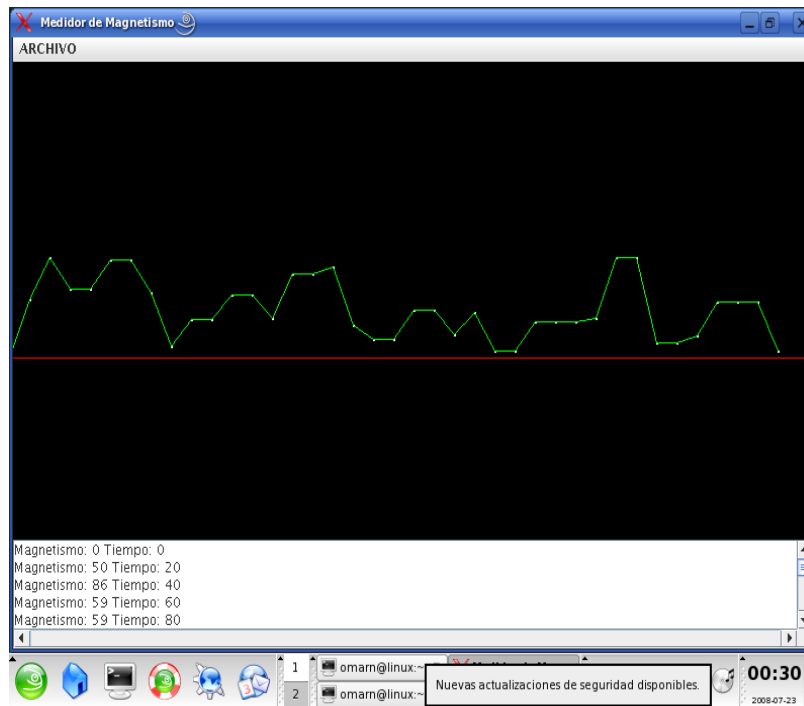


FIGURA 18. INTERFAZ Y RESULTADOS GRÁFICOS 2

Los magnetómetros contienen información independiente y en caso de un evento volcánico tendrán variaciones significativas dependiendo del lugar donde se encuentren. Para monitorear la información percibida por cada magnetómetro es necesario un sistema de sincronización y de exactitud en el tiempo de generación del evento, por lo que el software desarrollado controla la información de cada magnetómetro de manera independiente y los resultados son arrojados en tiempo real en el instante en que son generados. Esta nueva propuesta de tiempo real, innova con respecto a los sistemas programados en tiempo diferido, ya que se tendrán los datos al instante en que sucede el evento volcánico, esto permite ahorrar tiempo y tener una mejor planificación de contingencia. Esto se demuestra en el simulador al observar la actividad de ambos magnetómetros de manera independiente, pero durante el periodo de tiempo en que son generados los eventos magnéticos, como se muestra en la Figura 19.

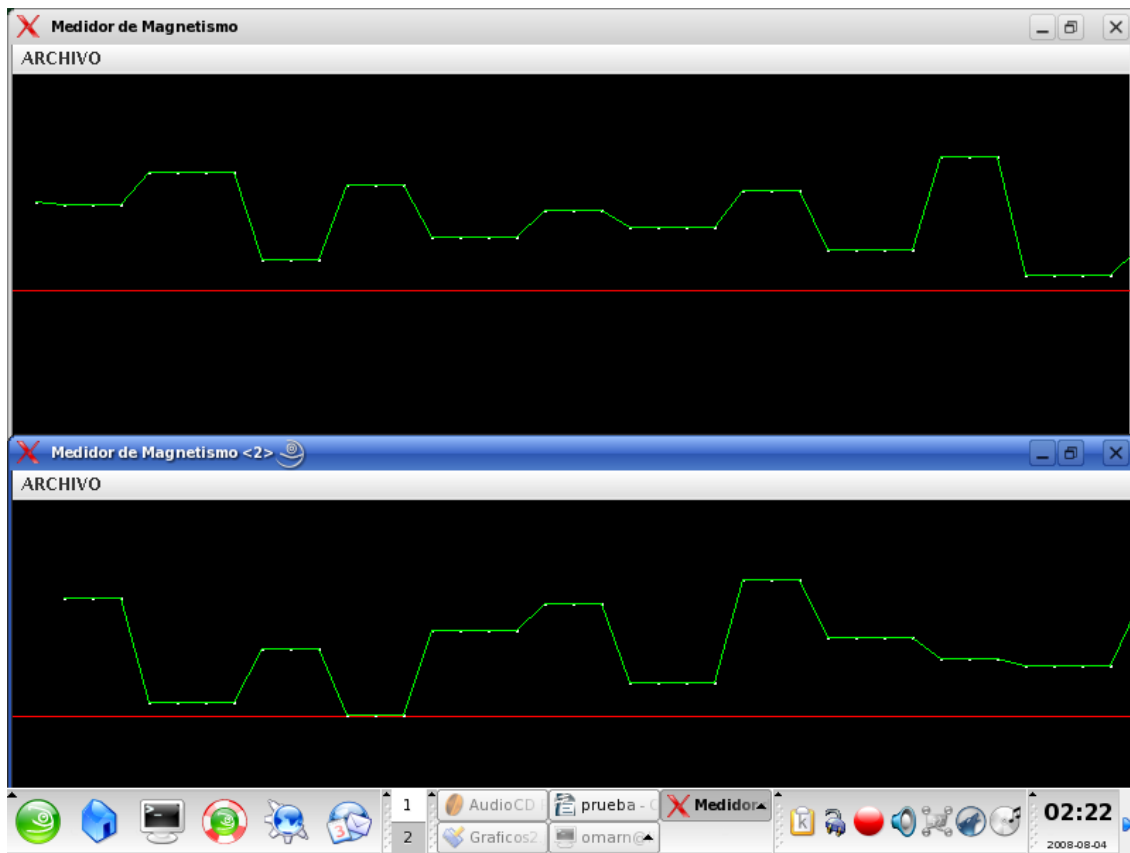


FIGURA 19. INDEPENDENCIA DE VALORES EN CADA MAGNETÓMETRO Y SUS RESULTADOS EN TIEMPO REAL

CONCLUSIÓN Y TRABAJO A FUTURO

Las principales aportaciones son: (a) el uso de metodologías SA-RT y LACATRE para solución de sistemas de Tiempo Real; (b) Se tiene un sistema de última generación para el desarrollo y uso de la tecnología en México; (c) se promueve la colaboración de diferentes disciplinas, ya que incluyó a estudiantes de las carreras de la Licenciatura en Ciencias de la Computación, Ingeniería en Ciencias de la Computación, Licenciatura en Ciencias de la Electrónica, Licenciatura en Ingeniería Topográfica y Geodésica, Ingeniería Geofísica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y de vulcanólogos especializados; (d) Una propuesta teórica de aplicación de las Redes Neuronales Artificiales para su implementación futura destinada a predecir eventos volcánicos de importancia.

El objetivo general del proyecto se cumplió de manera satisfactoria ya que se propuso un sistema automatizado en Tiempo Real tanto en la metodología, como en el simulador. Ya que con él, se facilitará la gestión de los datos para lograr una mejor prevención de desastres naturales.

Los objetivos específicos también se cumplieron de manera satisfactoria ya que el estudio de las variaciones magnéticas se realizará gracias a los datos numéricos obtenidos a partir de los magnetómetros; la información automatizada será recibida dentro de las oficinas del CUPREDER de la BUAP en Puebla, y gracias a esta información será posible implementar acciones de prevención, protección civil y evacuación con un fundamento científico válido y mucho más actualizado que cualquier sistema de monitoreo magnético en volcanes mexicanos que actualmente existen en el País. Una implementación futura del software incluye la filtración de la señal recibida de los magnetómetros con el objetivo de eliminar los campos magnéticos terrestres y de otros materiales que pudieran causar interferencia como la estructura volcánica, el campo electromagnético, las estructuras hechas por el hombre y todo material que pudiera causar ruido y dificultad de encontrar la señal deseada.

También se propuso los fundamentos teóricos para la implementación del módulo *P6 PREDICE* en el software para realizar predicciones de eventos volcánicos. Este tema se puede profundizar y posteriormente implementar como el proyecto realizado para pronosticar la velocidad del viento en el gran *Telescopio Milimétrico* “Una Red Recurrente Retardada en el Tiempo para Pronosticar la Velocidad del Viento y su Frente de Onda” [11].

Para el trabajo a futuro, en la transmisión de datos, el sistema deberá usar un microcontrolador que sea capaz de comunicarse con el sistema propuesto mediante un módulo GPRS y transmitir datos

numéricos para su análisis posterior obtenidos de los magnetómetros. Un ejemplo de microcontrolador, es el de la familia *phyCore MPC 565*, ya que cuenta con el puerto RS232 para la comunicación GPS, así como un puerto Ethernet para facilitar el acceso a la red y un sitio de Internet. El sistema operativo utilizado por el microcontrolador será un sistema completo en tiempo real que soportará la transmisión de señales inalámbricas mediante protocolos adecuados. Un ejemplo de dicho Sistema Operativo es el sistema *Open Source TinyOS*. Para acceder a Internet y a los datos de la red GPSR por medio del sistema RTSJ, se propone utilizar un ruteador IPL-G10 que permita crear un túnel seguro de comunicación IPSEC o SSL en la red GPRS, utilizando Ethernet [8]. La utilización de estos sistemas y mecanismos, se hará mediante el análisis y la verificación, que ayude a obtener mejores beneficios en la implementación del sistema.

La viabilidad del proyecto es real gracias a la aplicación de diferentes conceptos para analizar los datos con personas especializadas en vulcanología, electrónica, computación, así como su calidad en el diseño e implementación. Este tipo de aproximación, siempre es bueno para el desarrollo de México y para el beneficio de las personas que viven en este país. Sin embargo, las limitaciones de presupuesto y de apoyo por parte del gobierno federal y estatal para el desarrollo de Ciencia y Tecnología, frenan el desarrollo de proyectos científicos y por consecuencia, estancan el desarrollo de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] La Erupción Inalámbrica de un Volcán,
http://astrobiologia.astroseti.org/astrobio/articulo_1515_la_erupcion_inalambrica_volcan.htm revisado en 2008.
- [2] Automated System for Magnetic Surveillance of Active Volcanoes, <http://maglab.ct.ingv.it/en/index.html> revisado en 2008.
- [3] Enrique Guevara O, Roberto Quaas W, Carlos Valdés, Gilberto Castelán P, Alicia Martínez B, Javier Ortiz C., Francisco Galicia y Ángel Gómez V. “*El sistema de monitoreo y vigilancia del volcán Popocatepetl. 6.5 años de operación.*” Centro Nacional de prevención de Desastres, CENAPRED, México. Página de internet: <http://www.ugm.org.mx/pdf/geos01-3/REDES01-3.pdf> revisado en 2008.
- [4] BELSON Guillaume, cours 5IF “*Informatique Bio-Inspirée 5IF-IBI*” (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [5] AUBRI Régis, cours 4IF “*Assurance Qualité logicielle 4IF-QL*” (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [6] BABAU Jean-Philippe, cours 4IF “*Conception et Intégration d'Applications Industrielles, SA-RT Structured Analysis for Real-Time 4IF-CIAI*” (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [7] BABAU Jean-Philippe, cours 4IF “*Systèmes d'Exploitation avancés 4IF-SEA, conception Multitâches Lacatre/VxWorks*”, (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [8] BOURGUEOIS Charly, DOAN Hai-Ha, CARRE Jean -François, FRANCHET Angélique, LE Thuan-Nhi, LECOINTRE Adrien, NIÑO PRIETO Omar Ariosto, Réponse à l'appel d'offres, d'un “*Système de surveillance à distance des sites isolés*”, COPEUVE, (Comité pour la Protection de l'Environnement de l'Union Européene) Projet d'Ingénierie 4IF-QL, (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France) (*Proyecto de ingeniería del curso 4IF-QL, trabajo no publicado*).
- [9] Neural Network Frameworks, <http://www.redes-neuronales.netfirms.com/tutorial-redes-neuronales/que-son-las-redes-neuronales.htm> revisado en 2008.
- [10] Ciencias Cognitivas, *El paradigma del super Cerebro*,
http://cienciascognitivas.blogspot.com/2005_04_01_archive.html revisado en 2008.
- [11] Soancatl Aguilar Leobardo, “Una Red Recurrente Retardada en el Tiempo para Pronosticar la Velocidad

del Viento y su Frente de Onda”, Tesis de Maestría, BUAP-INAOE 1999.

[12] Sommerville Ian, “Ingeniería de Software” Addison Wesley, Pearson Education, 6a edición. México 2002.

[13]AMGHAR Youssef, cours 4IF “Conception de Systèmes d'Information 4IF-CP_CSI”. *Démarche Préliminaire ou étude préalable*, (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France).(Notas de curso)

[14]López Loera, Héctor ; Urrutia Fucugauchi, Jaime. Variaciones Vulcano-Magnéticas del Volcán de Colima, Revista Geofísica, 01-JAN-03. http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-32442053_ITM revisado en 2008.

[15] Piotr Szwed, *Lacatre Reference Guide*, programming tool, http://pszwed.ia.agh.edu.pl/RT/La4_rm/La4_rm.html revisado en 2008.

[16] Prih Hastono and Sorin A. Huss, *Automatic Generation of Executable Models from Structured Approach Real-Time Specifications*.

<http://www.vlsi.informatik.tu-darmstadt.de/staff/hastono/rtss04-sart.pdf>

revisado en 2008.

[17]J.A. McCall, Factors in Software Quality, General Electric no. 77C1502, juin 1977.

[18] Babau, Jean-Philippe, *SA-RT Structured Analysis for Real-Time*.

<http://www.if.insa-lyon.fr/chercheurs/jpbabau/cours/sart.pdf>

revisado en 2008.

[19] J. J. SCHWARZ, J. J. SKUBICH, Graphical programming for Real-Time Systems, *Control Engineering Practice*, Vol. 1, No. 1, pp. 43–49, 1993.

[20] Sistemas de vigilancia volcánica,

http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/volcanologia/B10_Red_de_vigilancia.htm revisado en 2008.

[21]Métodos electromagnéticos,

http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/download/Instrumentacion/08_OTRAS%20TECNICAS.pdf

revisado en 2008.

ANEXO: PUBLICACIÓN INTERNACIONAL POR PARTE DE IEEE,
DURANTE EL CONGRESO DE ANDESCON2008. EL CUSCO, PERÚ.

Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real

Omar Ariosto Niño Prieto, Luis Enrique Colmenares Guillen, Manuel Martín Ortiz, FCC-BUAP

Resumen—En el siguiente trabajo se presenta un Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real, que se utiliza para automatizar y facilitar la obtención de los datos en la actividad magnética del volcán Popocatepetl, que actualmente, es uno de los volcanes activos en México. Se utiliza la metodología (SA-RT y LACATRE) para diseñar el sistema en tiempo real, y la implementación se realiza con el modelo de bibliotecas de Java Real Time con RTSJ.

I INTRODUCCIÓN

Los volcanes activos son un riesgo para las sociedades que viven cerca de estos colosos, por ello es necesario estudiarlos para poder predecir algún acontecimiento catastrófico que incluye grandes pérdidas humanas materiales, dañando la economía de la región. Estos eventos no se pueden evitar, pero si se pueden prevenir con el objetivo de tener las menores pérdidas posibles ya sea humanas o materiales.

Los sistemas de software nos ayudan a predecir estos eventos, y gracias a la tecnología, se puede saber si habrá algún evento con un poco más de anticipación que antaño; por lo que la tecnología es una herramienta indispensable para prevenir a la población de este tipo de eventos.

El monitoreo volcánico es un trabajo riesgoso que requiere de tiempo para determinar manualmente el estado de un volcán activo utilizando herramientas sofisticadas para lograr el objetivo. Por lo que se necesitan sistemas computarizados que faciliten esta tarea. Actualmente existen sistemas que miden la actividad del volcán Popocatepetl en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) estudia la actividad del volcán Popocatepetl con la ayuda del Centro Universitario de Prevención de Desastres Regionales (CUPREDER), dependencia de la BUAP. Los instrumentos que permiten estudiar la actividad volcánica, se encuentran en algunos sensores de tierra, electrodos, así como un magnetómetro. Existe la posibilidad de obtener y trabajar con

un segundo magnetómetro en paralelo al primero. La información había sido obtenida gracias al trabajo de campo realizado y cierta información era recolectada con la ayuda de un magnetómetro. Los resultados obtenidos son analizados por especialistas que pueden dar un pronóstico de la actividad volcánica.

El reto comienza porque se carece de un sistema de tiempo real de monitoreo magnético y los datos obtenidos dentro del trabajo de campo son insuficientes. El equipo de trabajo conformado por personas de diferentes áreas, como geólogos, vulcanólogos, ingenieros, se tiene que trasladar directamente al volcán para obtener los datos. Por cada sesión es necesario invertir un día entero para obtener información del volcán, además de los gastos de traslado, alimentación y personal.

También existen desventajas visibles en el sistema de monitoreo volcánico del CENAPRED, con el daño del radar doppler meteorológico [3] y la gran cantidad de computadoras utilizando sistemas antiguos.

Los beneficios sociales a largo, mediano y corto plazo son conocer la información de la actividad del volcán Popocatepetl para poder implementar programas de protección civil en un menor tiempo y en caso de que exista actividad intensa, salvar el mayor número de vidas y tratar de tener un impacto económico positivo debido a la prevención.

Los usuarios reales serán los geólogos y vulcanólogos de la BUAP y CUPREDER quienes analizarán la información recibida para tener más elementos de planeación y de protección civil. Los beneficiados serán todas las personas que habitan en comunidades cercanas al volcán y los habitantes de la ciudad de Puebla.

Por lo expuesto anteriormente, se propone el siguiente trabajo de monitoreo volcánico. Este trabajo se divide en las secciones siguientes: en la Sección I se presenta una *introducción*, en la sección II se presenta el trabajo *relacionado* dónde se describen algunos de los sistemas existentes, en la sección III se presenta *el sistema propuesto* dónde se analizan los objetivos del sistema y la propuesta del *Sistema*, en la sección IV se presenta la *Metodología del sistema de monitoreo volcánico en tiempo real* dónde se discute el diseño del sistema de manera específica y para

finalizar en la sección *V* se presentan las *conclusiones y el trabajo a futuro* donde se dan las conclusiones del trabajo y el futuro del proyecto.

II TRABAJO RELACIONADO

Sistema con sensores inalámbricos

Actualmente investigadores de Harvard han colocado un conjunto inalámbrico de sensores para monitorear la actividad sísmica en Ecuador. Los sismólogos recogen grandes cantidades de datos, pero la carga de los instrumentos que bajan al volcán se verán aligerados tanto en costo como en peso al ser inalámbricos. Científicos de la Universidad de New Hampshire y de la Universidad de Carolina del Norte para colocar un equipo inalámbrico en un pico ecuatoriano y monitorear la actividad volcánica. Los sensores ayudarán a los investigadores, oficiales, y residentes locales, a comprender y planificar ante las erupciones de Tungurahua, uno de los volcanes más activos de Ecuador en los últimos años.

Los investigadores instalaron la red inalámbrica en Tungurahua y recogieron durante 54 horas datos durante un viaje reciente a la montaña de 5.016 metros de elevación. El sistema inalámbrico podría eventualmente reemplazar a los sensores con cable utilizados en la actualidad.

Los sistemas utilizados para monitorear la actividad volcánica recogen rápidamente enormes cantidades de datos. Los sistemas con cable que se utilizan ahora para monitorear a los volcanes, son de costo elevado y agotan rápidamente sus baterías; esto obliga a las personas a subir las laderas de los volcanes frecuentemente durante varios días para recuperar los datos que se han acumulado.

Estos investigadores instalaron una red de cinco diminutos módulos sensores inalámbricos de baja energía equipados con un micrófono especial para monitorear las señales infrasónicas (acústica de baja frecuencia) emitidas durante las erupciones. Cada uno de ellos funciona con dos baterías AA, está sellado en un contenedor a prueba de agua del tamaño de una jabonera, y trasmite datos automáticamente a un puesto de observación que se encuentra a más de 8 kilómetros de distancia. [1].

Sistema de monitoreo MAGNET

El sistema MAGNET fue desarrollado en Italia para monitorear la actividad del Monte Etna. Los investigadores coinciden de que existe una correlación significativa entre la actividad volcánica y el campo geomagnético observado en diversos volcanes activos. Una de las desventajas de los sistemas de monitoreo volcánico, es el acceso limitado a los datos del monitoreo en espacio y tiempo, por lo que este sistema propone como ventaja la transmisión rápida de la información mediante sensores y un sistema

que utilizan el tipo PC/104 Standard compatible con la arquitectura PC/AT. La información es transmitida por teléfonos móviles utilizando el sistema GSM en la banda de 900 Mhz. El software utilizado para el sistema está desarrollado en C++ con la estructura de tipo Cliente-Servidor. [2].

Sistema de monitoreo del CENAPRED

El sistema de vigilancia y monitoreo del volcán Popocatepetl ha demostrado su utilidad en la evaluación de la actividad del volcán desde 1994. En un esfuerzo conjunto del CENAPRED, de la Secretaría de Gobernación; de los Institutos de Geofísica e Ingeniería, de la UNAM; y con la colaboración del Observatorio Vulcanológico de los Cascades (CVO), y del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey); se estableció en los últimos años un moderno y completo sistema de observación telemétrico con una central de adquisición y procesamiento de datos. Este sistema, ha logrado 6 años de funcionamiento interrumpido.

Esto ha permitido la vigilancia estrecha del volcán Popocatepetl así como la detección oportuna de cualquier cambio en su estado de actividad. La red de monitoreo del Popocatepetl actualmente está compuesta por 15 estaciones localizadas en las laderas circundantes del volcán, en sitios con altitudes de hasta 4300m y a 1.5 Km. del cráter. La

instrumentación consta de 8 sismógrafos de periodo corto y 3 de banda ancha; 4 inclinómetros biaxiales para medir deformación; una cámara de video controlada en forma remota desde el CENAPRED con enlace de microondas; 3 detectores de flujo en el costado norte del volcán; un radar doppler meteorológico (actualmente dañado); una cámara térmica y diversos equipos para mediciones geodésicas, análisis químicos, determinación de las concentraciones de gases SO₂ y CO₂. Más de 50 señales de telemetría son transmitidas en forma continua hacia el puesto central de registro y procesamiento localizado en el CENAPRED. Allí se reciben todas las señales y mediante una extensa red de computadoras, la actividad es monitoreada y procesada las 24 horas del día.

Al detectarse cualquier incremento anormal de la actividad sísmica del volcán, se acciona una alarma acústica y a través de un sistema de marcado automático se envían mensajes a teléfonos particulares, celulares y radio-localizadores del personal de guardia, indicando la intensidad de las señales en diferentes estaciones sísmicas [3].

III SISTEMA PROPUESTO

Los sistemas de monitoreo y vigilancia son muy importantes en la evaluación y en los pronósticos de la actividad de los volcanes. Por lo que es vital pronosticar, monitorear y evaluar la actividad volcánica de forma

automatizada.

Se tiene como objetivo general proponer un sistema de dispositivos, ya que mediante un estudio de uso [8], los dispositivos pueden ser alimentados mediante placas solares y volcán Popocatepetl que facilite la gestión de datos en tarjetas electrónicas diseñadas para ello. Dichos dispositivos de prevención de desastres naturales. Como objetivos específicos necesitan de una interfaz de Hardware para transmitir la información magnética de forma inalámbrica a una red de

5) Crear una implementación para un sistema empujado tipo GSM, que a su vez la transmitirá por Internet y (embedded) basado en los datos de los magnetómetros finalmente los datos serán recibidos por el Sistema de Monitoreo en Tiempo Real basado en RTSJ (Real Time

6) Proporcionar información automatizada de la actividad volcánica a la ciudad más próxima al volcán Popocatepetl: también contaría con la comunicación mediante el sistema GPS para identificar la ubicación de los magnetómetros. (Fig.

7) Obtener información inmediata para implementar acciones de prevención, protección civil, alerta y evacuación.

8) Predecir algún evento anormal dentro de la actividad magnética del volcán, mediante el estudio de algoritmos de redes neuronales [4].

El sistema está dentro del nivel de exigencias de tipo A debido a la magnitud del fenómeno según la Norma internacional ISO/CEI 9126 que define los niveles de exigencia para un dominio de aplicación, según los riesgos o los daños ocurridos después de la falla de un Sistema de Información mostrados en la Tabla 1 [5, 11].

Tabla 1 Nivel de Exigencia de los Sistemas de Información.

Dominios de aplicación	Nivel de exigencia D	Nivel de exigencia C	Nivel de exigencia B	Nivel de exigencia A
Seguridad humana	Daño menor de bienes, sin riesgo a la vida de las personas.	Daño de bienes y riesgo hacia la integridad de las personas.	Riesgo de pérdidas humanas.	Riesgo de pérdidas humanas numerosas. (Catástrofe)
Economía	Pérdida económica muy baja.	Pérdida económica considerable	Pérdida económica importante. (Compañía en peligro)	Desastre financiero. (Riesgo de la desaparición de la compañía)
Seguridad en el sistema	Ningún riesgo existente.	Riesgo de errores.	Servicios e información críticas.	Servicios e información críticos estratégicos de la empresa.
Medio Ambiente	Ningún riesgo para el medio ambiente.	Deterioro del medio ambiente.	Deterioro importante del medio ambiente, pero aún recuperable	Deterioro del medio ambiente irreversible.

Arquitectura general del Sistema

Se utilizan 2 magnetómetros (M1, M2) sobre 2 puntos estratégicos sobre las faldas del volcán Popocatepetl para monitorear el magnetismo de manera autónoma; dicha

autonomía también es referente al modo de alimentación de los dispositivos, ya que mediante un estudio de uso [8], los dispositivos pueden ser alimentados mediante placas solares y volcán Popocatepetl que facilite la gestión de datos en tarjetas electrónicas diseñadas para ello. Dichos dispositivos de prevención de desastres naturales. Como objetivos específicos necesitan de una interfaz de Hardware para transmitir la información magnética de forma inalámbrica a una red de GSM, que a su vez la transmitirá por Internet y (embedded) basado en los datos de los magnetómetros finalmente los datos serán recibidos por el Sistema de Monitoreo en Tiempo Real basado en RTSJ (Real Time Specification for Java) para efectuar el monitoreo. El sistema también contaría con la comunicación mediante el sistema GPS para identificar la ubicación de los magnetómetros. (Fig.

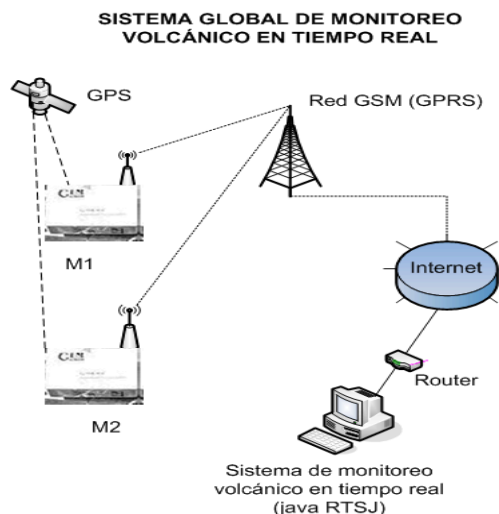


Fig. 1 Diagrama de la Arquitectura General del Sistema.

Material utilizado

Se propone un sistema de Tiempo Real que use los dispositivos existentes: dos magnetómetros instalados en las cercanías del volcán Popocatepetl que registran la actividad magnética del volcán. Se incorpora un sistema de transmisión de datos mediante la conversión de la señal analógica a digital y transportada por medio inalámbrico hasta el centro de investigación del CUPREDER de la BUAP.

El sistema de cómputo incluye una computadora con una capacidad de almacenamiento de 250 GB para guardar toda la información proveniente del monitoreo magnético en una Base de Datos creada para ello. El motor de Base de datos es MySQL. Tiene como Sistema Operativo alguna distribución de LINUX compatible con las librerías del RTSJ de JAVA para los sistemas de tiempo real i.e.: SUSE 10, DEBIAN, Fedora, y como nueva propuesta Red Hat y FREE BSD. El software está desarrollado utilizando las librerías del RTSJ que reciben las señales enteras provenientes de los magnetómetros. Posteriormente dichos datos se guardan y son interpretados por otro programa con interfaz de usuario (GUI). El proyecto tiene integrado un sistema de alarma

automático, que alertará a las autoridades y personas También pueden ser visualizadas las alarmas en caso de competentes automáticamente en caso de registro de actividad registrar alguna actividad anormal, información obtenida volcánica anormal. gracias al trabajo en conjunto con vulcanólogos del CUPREDER. Los datos son guardados en una Base de Datos

VI METODOLOGÍA DEL SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO EN TIEMPO REAL y por medio de un subsistema de análisis, los vulcanólogos pueden acceder a ella para trabajar con la información

El sistema fue diseñado para monitorear la información almacenada sobre el monitoreo. (Fig. 2) magnética del volcán Popocatepetl recibida en tiempo real, A continuación en la figura 3 y 4 se muestran el Diagrama de Flujo de Datos y el Diagrama de Estado-Transición de ingeniería de software utilizada para desarrollar el sistema respectivamente, que muestran una estrecha relación del funcionamiento del sistema:

que nos proporciona una visión coherente y estructurada sobre el desarrollo de sistemas de tiempo real, así como la implementación del lenguaje formal LACATRE (*Langage d'Aide à la Conception d'Applications en Temps Réel*) [7, 9, 13] para comprender fácilmente la estructura del programa desarrollado para efectuar el monitoreo volcánico.

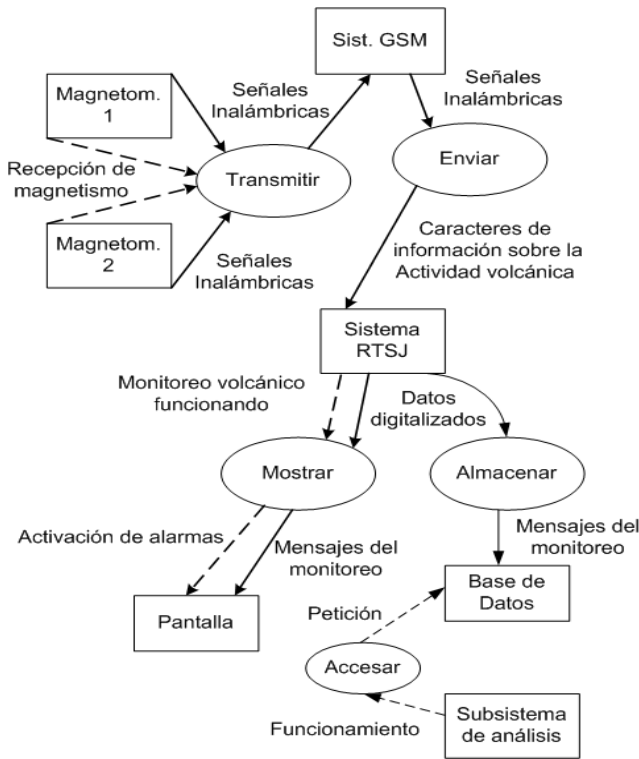


Fig. 2 Diagrama de Contexto del Sistema.

El objetivo de los magnetómetros es de *transmitir* las señales magnéticas del volcán al sistema de monitoreo volcánico, éstos tendrán el evento de *Recepción de magnetismo* proveniente de la actividad volcánica que enviarán señales inalámbricas al sistema de comunicación de datos a distancia (*Sist. GSM*) y a su vez, al sistema RTSJ. El sistema de monitoreo volcánico muestra la actividad actual del volcán Popocatepetl de una manera automatizada, que contiene funciones para visualizar la información en Pantalla.

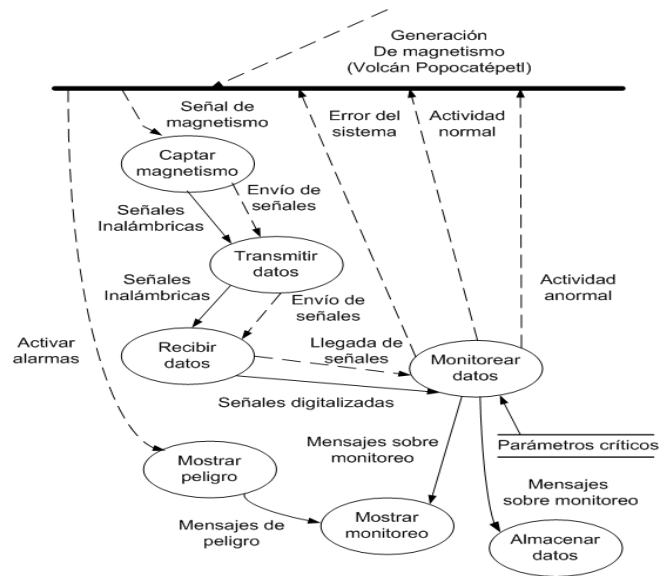


Fig. 3 Diagrama de Flujo de Datos (DFD) del Sistema.

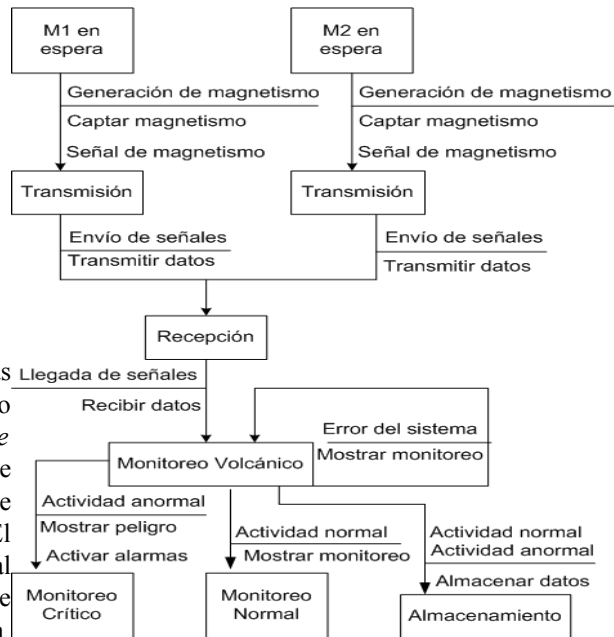


Fig. 4 Diagrama de Estado-Transición del Sistema.

PREDECIR (). Esta función hace una predicción de la

En la Figura 3 se muestran los procesos realizados de la actividad magnética del volcán usando algoritmos de redes sistema así como los eventos que entran y salen de la barra de neuronales [8]. En caso de un evento anormal, se enviará un control y los datos relacionados y transmitidos entre cada mensaje a *MsgB* y a su vez activará otro tipo de alarma para proceso. Hay un almacenamiento de datos o *parámetros* prevenir sobre un posible evento anormal o una catástrofe.

críticos, que permiten hacer la comparación de la actividad magnética actual, y decidir si corresponde a un estado normal o anormal dentro de la actividad volcánica. En la figura 4 se muestran los estados del sistema y sus transiciones que derivan del DFD previo.

El diseño del software está representado mediante el lenguaje formal gráfico *LACATRE* para representar las aplicaciones desarrolladas en tiempo real, y facilitar el diseño del sistema. (Fig. 5)

El programa fuente se divide en diferentes módulos; la función principal P1, *main* () trabajará directamente con los hilos (*Threads*) siguientes:

- P2: MAGNETOMETRO_1, con prioridad 1.
- P3: MAGNETOMETRO_2, con prioridad 2.
- P4: MONITOREO, con prioridad 3.
- P5: ALARMA, con prioridad 4.
- P6: PREDICE, con prioridad 5.

Todos los hilos están sincronizados mediante semáforos para asegurar que todos los procesos sean realizados en sincronía y con datos correctos. Las señales provenientes de los magnetómetros son digitalizadas y obtenidas mediante un protocolo de comunicación de datos, y son transmitidas mediante un Recurso de datos (*R.S.*) a los hilos P2 y P3. A su vez muestran la actividad actual mediante el llamado de la función *MOSTRAR* () que contiene los procedimientos para mostrar los datos numéricos en pantalla. Posteriormente se escriben en una Base de Datos (*B.D.*) y los mensajes de cada magnetómetro se envían a estructuras de datos de tipo FIFO de tamaño *n*, *MsgA* de manera independiente. Estos mensajes son transmitidos al hilo P4 quién inicia el monitoreo de la actividad mediante el llamado a las funciones como *GRAFICAR* (), *M_CRITICO* () y *M_NORMAL* () quienes contienen la información magnética del volcán, la actualizan en un tiempo determinado, y la almacenan en la *B.D.*

Si existe una actividad anormal, la función *M_CRITICO*(), envía un mensaje a otra estructura de datos FIFO llamado *MsgB* quién contiene el tipo de anormalidad y su grado de peligro. Los mensajes de *MsgB* son transmitidos al hilo P5, quién escribe un informe del problema en la Base de Datos y posteriormente activará una alarma dependiendo del tipo de severidad del problema. Esto se mide mediante el tipo de datos *n* proveniente de *MsgB*. Se mostrará un mensaje de la actividad anormal en pantalla mediante el llamado de la función *MOSTRAR*().

El sistema también cuenta con un proceso P6 llamado *PREDICE* que tiene acceso a la Base de Datos y a la función

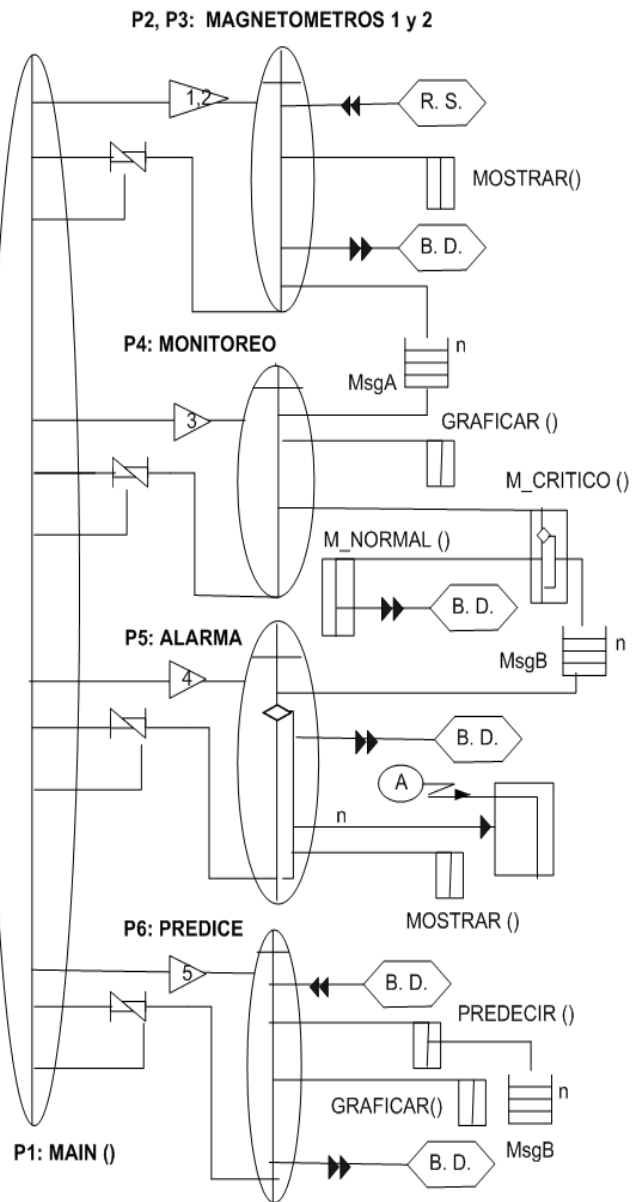


Fig. 5 Diagrama LACATRE

La arquitectura del sistema está formada por una Interfaz Hombre-Máquina (IHM) que será utilizada por vulcanólogos. La entrada, son las señales magnéticas inalámbricas transformadas en bits para su tratamiento dentro del sistema de monitoreo volcánico en tiempo real. El mantenimiento es realizado por una persona especializada en software o hardware (Operador) y la salida de datos muestra el monitoreo en pantalla. (Fig. 6)

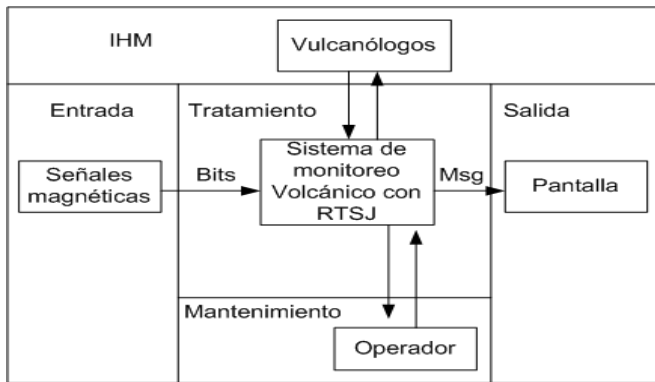


Fig. 6 Diagrama de Contexto de la Arquitectura del Sistema.

V CONCLUSIÓN Y TRABAJO A FUTURO

Las principales aportaciones son, efectuar el análisis detallado del Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real utilizando las metodologías SA-RT y LACATRE, y proponer un sistema de última generación para el desarrollo del uso de la tecnología en México.

El proyecto incentiva la colaboración de diferentes disciplinas ya que la implementación final de la propuesta incluye la participación de estudiantes de las carreras de la Licenciatura en Ciencias de la Computación, Ingeniería en Ciencias de la Computación, Licenciatura en Ciencias de la Electrónica, Licenciatura en Ingeniería Topográfica y Geodésica, Ingeniería Geofísica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y de vulcanólogos especializados.

Para el trabajo a futuro, en la transmisión de datos, el sistema deberá usar un microcontrolador que sea capaz de comunicarse con el sistema computarizado distante mediante un módulo GPRS. Un ejemplo de microcontrolador, es el de la familia *phyCore MPC 565*, ya que cuenta con el puerto RS232 para la comunicación GPS, así como un puerto Ethernet para facilitar el acceso a la red. El sistema operativo utilizado por el microcontrolador será un sistema completo en tiempo real que soportará la transmisión de señales inalámbricas mediante protocolos adecuados. Un ejemplo de dicho Sistema Operativo es el sistema *Open Source TinyOS*. Para acceder a Internet y a los datos de la red GPRS por medio del sistema RTSJ, se propone utilizar un ruteador IPL-G10 que permita crear un túnel seguro de comunicación IPSEC o SSL en la red GPRS, utilizando Ethernet [8]. La utilización de estos sistemas y mecanismos, se hará mediante el análisis y la verificación, que ayude a obtener mejores beneficios en la implementación física del sistema y para su mantenimiento.

REFERENCIAS

- [1] [La Erupción Inalámbrica de un Volcán.](http://astrobiologia.astroseti.org/astrobio/articulo_1515_la_erupcion_inalamb_rica_volcan.htm) http://astrobiologia.astroseti.org/astrobio/articulo_1515_la_erupcion_inalamb_rica_volcan.htm revisado en 2008.
- [2] Automated System for Magnetic Surveillance of Active Volcanoes, <http://maglab.ct.ingv.it/en/index.html> revisado en 2008.
- [3] Enrique Guevara O, Roberto Quaaas W, Carlos Valdés, Gilberto Castelán P, Alicia Martínez B, Javier Ortiz C., Francisco Galicia y Ángel Gómez V. "El sistema de monitoreo y vigilancia del volcán Popocatepetl. 6.5 años de operación." Centro Nacional de prevención de Desastres, CENAPRED, <http://www.ugm.org.mx/pdf/geos01-3/REDES01-3.pdf> Revisado en 2008.
- [4] BELSON Guillaume, cours 5IF "Informatique Bio-Inspirée 5IF-IBI" (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [5] AUBRI Régis, cours 4IF "Assurance Qualité logicielle 4IF-QL" (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [6] BABAU Jean-Philippe, cours 4IF "Conception et Intégration d'Applications Industrielles, SA-RT Structured Analysis for Real-Time 4IF-CIAF" (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [7] BABAU Jean-Philippe, cours 4IF "Systèmes d'Exploitation avancés 4IF-SEA, conception Multitâches Lacatre/VxWorks", (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France). (Notas de curso)
- [8] BOURGUEOIS Charly, DOAN Hai-Ha, CARRE Jean -François, FRANCHET Angélique, LE Thuan-Nhi, LECOINTRE Adrien, NIÑO PRIETO Omar Ariosto, Réponse à l'appel d'offres, d'un "Système de surveillance à distance des sites isolés", COPEUVE, Projet d'Ingénierie 4IF-QL, (Année 2007-2008), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, France) (Proyecto de ingeniería del curso 4IF-QL, trabajo no publicado).
- [9] Piotr Szwed, *Lacatre Reference Guide*, programming tool, http://pszwed.ia.agh.edu.pl/RT/La4_rm/La4_rm.html revisado en 2008.
- [10] Prih Hastono and Sorin A. Huss, *Automatic Generation of Executable Models from Structured Approach Real-Time Specifications* <http://www.vlsi.informatik.tu-darmstadt.de/staff/hastono/rtss04-sart.pdf> 2008.
- [11] J.A. McCall, *Factors in Software Quality*, General Electric no. 77C1502, juin 1977.
- [12] Babau, Jean-Philippe, SA-RT "Structured Analysis for Real-Time" <http://www.if.insa-lyon.fr/chercheurs/jpbabau/cours/sart.pdf> Rev. 2008.
- [13] J. J. SCHWARZ, J. J. SKUBICH, Graphical programming for Real-Time Systems, *Control Engineering. Practice*, Vol. 1, No. 1, pp. 43-49, 1993.

Niño Prieto Omar Ariosto, Nació en Puebla, Pue. México el 2 de enero de 1984. Realizó estudios de preparatoria en el Instituto Oriente de Puebla, Bachillerato CCH incorporado a la UNAM. Ingresó a la Licenciatura en Ciencias de la Computación en la BUAP (2002), realizando una estancia de estudios en Université Laval, Quebec, Canadá, (2005-2006). Posteriormente terminó los créditos obligatorios de la licenciatura en la FCC-BUAP (2006-2007) y realizó una estancia de estudios en l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (INSA de Lyon, Francia) (2007-2008) para finalizar el currículo de la Licenciatura. El Sistema de Monitoreo Volcánico en Tiempo Real, es la Tesis de licenciatura realizada para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Computación, aplicando los conocimientos adquiridos en la BUAP y en el INSA de Lyon.

Durante el verano 2005, realizó prácticas profesionales en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) en el departamento de informática. Tiene la asistencia a diversos congresos de computación e informática en Puebla, así como el dominio de los idiomas Español, Francés e Inglés. Sus intereses son los Sistemas de Tiempo Real, las Imágenes Digitales, la Informática Bio-inspirada, la IA, así como la Organización y Gestión de la Producción en las empresas utilizando Tecnologías de Información.

Luis Enrique Colmenares Guillén, Realizó sus estudios de la Licenciatura en Computación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en la Facultad de Ciencias Físico-matemáticas. Los estudios de Maestría en la Universidad de las Américas Puebla obteniendo el título de Maestro en Ciencias. El doctorado fue realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona España, en la especialidad de Sistemas distribuidos en el Departamento de arquitectura de computadores.

Actualmente está como profesor investigador de tiempo completo en la Facultad de Ciencias de la Computación de la Benemérita Universidad autónoma de Puebla. Imparte asignaturas de las curriculas de Licenciatura, Ingeniería y Postgrado. Pertenece al cuerpo académico de Sistemas de Información, y colabora con la Dirección General de Innovación educativa. Esta en diferentes proyectos de Sistemas Distribuidos, Sistemas de Tiempo Real, Computo Pervasivo y Computo Ubicuo.

Manuel Martín Ortiz, Realizó sus estudios de Física en La facultad de Ciencias físico-matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, obtuvo su maestría y doctorado en el Instituto de Física de la misma universidad. Actualmente está como profesor investigador de tiempo completo en la Facultad de Ciencias de la Computación de la Benemérita Universidad autónoma de Puebla. Imparte asignaturas de las curriculas de la Licenciatura, Ingeniería, Postgrado y Diplomado. Es responsable del cuerpo académico de Sistemas Distribuidos y del Centro de Información "Alejandro Reyes Cristiani" de la F.C.C. Es responsable de la "Olimpiada Mexicana de Informática" a Nivel Estatal (Puebla), es miembro de la Comisión de Tesis de la F.C.C. y es corresponsable del Area de Servicios de Red de la F.C.C. Tiene relación de numerosos artículos nacionales e internacionales arbitrados así como numerosas Tesis dirigidas de nivel licenciatura y postgrado.

Es Miembro de la American Computer Machinery (ACM) y tiene experiencia como profesor desde 1978 en la enseñanza superior. Cuenta con 18 publicaciones Nacionales y Locales y 12 publicaciones internacionales arbitradas. Ha impartido conferencias a nivel nacional e internacional.