



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA
AUTOMATIZADO PARA EL MONITOREO DE
DEFORMACIONES VOLCANICAS EN
TIEMPO CUASI REAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO

P R E S E N T A N:

ERRASTI OROZCO ULISES
JUAREZ GUERRERO JESUS ANTONINO
HUERTA ROLDAN MARCO ANTONIO

DIRECTORES:

DR. SERVANDO DE LA CRUZ REYNA

M. EN I. VICTOR J. GONZALEZ VILLELA



CIUDAD UNIVERSITARIA AGOSTO DEL 2000

282495



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

El desarrollo y buen término de este trabajo de tesis fue posible gracias al apoyo de las siguientes instituciones:

- Consejo Nacional para la Ciencia y Tecnología (CONACYT) con número de proyecto 25497 - T y la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA - UNAM) con clave IN106397, por el financiamiento económico otorgado al Instituto de Geofísica de la UNAM, entidad encargada de la dirección del proyecto.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX) por su cooperación y todas las facilidades otorgadas para la ubicación e instalación del equipo, el cual se encuentra en el interior de su estación repetidora en Tlamacas.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por su apoyo en el desarrollo del proyecto el cual se llevó a efecto en su mayoría dentro de sus instalaciones.

Y a todo el personal de cada una de estas instituciones que participó directa o indirectamente en la realización de este proyecto.

A mi Papá

A mi Mamá

A mi Hermana

A mis amigos

Por su constante e incondicional apoyo y paciencia

Ulises

A mis Padres

A mis Hermanos

A mis Amigos

Gracias por su apoyo y comprensión

Marco

A Dios.

Por todas las oportunidades que ha puesto en mi camino y haberme permitido concretar los objetivos que me he planteado hasta ahora.

A mis padres:

Porque siempre e incondicionalmente han estado conmigo y me han permitido ser libre Gracias a ustedes mi vida tiene sentido.

A Vicki.

Nunca olvidaré que existen cosas que son sumamente importantes y que no pueden dejar de hacerse por motivo alguno.

A Liz

Tu voluntad y entereza no dan tregua.

A Andy:

A pesar de tu ausencia he seguido todas tus enseñanzas. El legado que me dejaste es de un valor incalculable.

A Ale y Martín:

Su ejemplo me llevó por el camino del estudio.

A Guille, Chavo y Beny

Por ayudarme a entender que se puede aprender mucho de las personas

A Esti, Alexis y Nestali:

Porque deseo ser un buen ejemplo para ustedes, espero no defraudarlos.

A mis primos.

Porque no han dejado a un lado las metas que se han propuesto y por ser al mismo tiempo ejemplo de los pequeños de casa.

A mis amigas y amigos:

Créanme que nunca en mi vida escolar había encontrado gente tan especial como ustedes, de verdad les agradezco que sean tan competitivos.

A todos los que no mencioné:

Sus aportaciones han sido de gran valía y me han permitido definir el camino a seguir.

Jesus

Diseño e Implementación de un sistema Automatizado para el Monitoreo de Deformaciones Volcánicas en Tiempo Cuasi Real

Índice

	Pág.
Introducción	1
Capítulo 1: Aspectos Generales	
1.1 El Monitoreo Volcánico y su Importancia	2
1.2 Generalidades Acerca de deformaciones Volcánicas	3
1.3 Descripción de las Técnicas más Comunes para la Determinación de Deformaciones	3
Capítulo 2: Aspectos sobre la Medición de las Deformaciones Volcánicas	
2.1 Método Empleado en la Actualidad	7
2.2 Interpretación de los Datos de la Medición de Distancia Obtenidos con Distanciómetros Electrónicos	9
2.3 Comparación con Otros Sistemas	11
2.4 Justificación del Diseño	12
2.5 Modelos de Deformación Adoptados en otros Volcanes	13
Capítulo 3: Diseño del Sistema	
3.1 Planteamiento del Sistema	15
3.2 Sistema Mecánico	15
3.2.1 Cinemática	16
3.2.2 Dinámica	20
3.2.3 Resultados de la Dinámica del Sistema	21
3.2.4 Diseño de una Ventana Automática para la Operación del Sistema	31
3.2.5 Diseño de la estructura superior y soporte – base	33
3.3 Sistema Electrónico	38
3.3.1 Sistema de Control de la Ventana Automática	38
3.3.2 Regulador de Voltaje para Alimentar al Distanciómetro Electrónico	40
3.3.3 Interfaces de Comunicación	40
3.4 Telecomunicaciones	43
3.5 Programación y Control	46
3.5.1 Diseño del Algoritmo de Búsqueda	46
3.5.2 Forma de Operación	49
3.5.3 Descripción Y Funcionamiento de los Programas de Control y Adquisición de Datos	51
Capítulo 4: Implementación del Sistema	
4.1 Ensamble del Equipo	55
4.2 Indtalación en la estación de monitoreo	56

Índice	Pág.
Capítulo 5: Resultados	
5.1 Características Finales del Equipo	61
5.2 Mediciones desde la Estación de Monitoreo	63
5.2.1 Ubicación de los Puntos de Medición	66
Conclusiones	68
Apéndices	
Apéndice A: Costos	69
Apéndice B: Dibujos Mecánicos	70
Apéndice C: Diagramas Electrónicos Esquemáticos	75
Apéndice D: Especificaciones del Equipos	77
Notas al final	84
Bibliografía ~ Hemerografía	85

Introducción

A raíz de las diferentes erupciones volcánicas que han tenido lugar en diversas partes del mundo, ha surgido la necesidad de crear distintos sistemas de monitoreo capaces pronosticar con antelación tales sucesos.

Debido a la presente actividad del volcán Popocatepetl, registrada desde el año de 1993, personal del Instituto de Geofísica - UNAM y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) se han dado la tarea de monitorear las diferentes manifestaciones volcánicas, entre las que se encuentran sismicidad y deformaciones del edificio volcánico.

Para tal propósito en la actualidad se cuenta con varios equipos e instrumental capaces de proporcionar datos e información útiles para el análisis de su comportamiento. La mayor parte de esta información es interpretada con la finalidad de elaborar pronósticos sobre una posible erupción.

El monitoreo de las deformaciones se ha venido haciendo desde hace varios años en otras partes del mundo utilizando extensómetros, inclinómetros, sistemas de posicionamiento global y distanciómetros electrónicos entre otros. Actualmente el Popocatepetl cuenta con varios de estos sistemas y se ha hecho énfasis en el uso de distanciómetros electrónicos debido a la precisión que manejan y a la posibilidad de detectar deformaciones de corta duración.

Con base en los estudios hechos recientemente sobre la deformación del volcán¹, ha sido posible dar paso al desarrollo de un sistema, basado en la medición con distanciómetros electrónicos láser, que de manera automática permita monitorear continuamente una red geodésica y a su vez se obtengan datos en tiempo cuasi real.

Con la medición de la variación de las distancias entre el distanciómetro y los diferentes puntos que componen la red geodésica es posible determinar las deformaciones relativas del volcán.

La interpretación correcta de estos datos, tratados estadísticamente, son usados en la elaboración de un modelo, el cual puede ser de gran importancia para pronosticar una erupción.

Capítulo 1: Aspectos Generales

1.1 El Monitoreo Volcánico y su Importancia

Es bien sabido que los volcanes representan una amenaza para la sociedad. La comunidad científica ha estimado que cerca de 260,000 personas han perdido la vida por efecto de desastres volcánicos desde el año 1,700 D.C. (Barberi et al., 1990), dichos desastres han involucrado la pérdida de ecosistemas y aún de ciudades enteras.

Hace apenas unos años era difícil prever los riesgos asociados con los volcanes debido al poco conocimiento científico acerca de ellos. Los Romanos atribuían los problemas volcánicos y otros fenómenos como los terremotos a la salida violenta hacia la superficie del viento encerrado dentro de la Tierra. Los Polinesios creían que la actividad volcánica era causada por la hermosa pero violenta diosa de los volcanes "Pele" siempre que era molestada por otras deidades o por mortales.

Actualmente sabemos que las erupciones volcánicas ocurren cuando el boyante *magma* (roca fundida) que se encuentra en el fondo de la tierra asciende a la superficie y es expulsado junto con gases a grandes presiones. También se ha demostrado que el conocimiento y evaluación del estado de actividad de un volcán por medio de sistemas de monitoreo apropiados, nos permite detectar oportunamente cambios en dicha actividad. A pesar de que aún no es posible predecir exactamente el lugar y tiempo de una erupción con estos sistemas, si es factible determinar una actividad inminente, lo cual nos podría servir a su vez para poner en marcha planes emergentes de protección civil.

El monitoreo sistemático se lleva a cabo en algunos volcanes activos en lugares como Hawaii, Italia, Japón, Nueva Zelanda, Kamchatka (Rusia) y recientemente México; también existen centros de observación de volcanes activos en Indonesia, El Caribe, Filipinas y América latina. La mayoría de los volcanes activos no son monitoreados, son poco comprendidos, y en consecuencia, extremadamente peligrosos si se localizan en regiones pobladas².

Los sistemas de monitoreo utilizan equipo especializado de medición para detectar los cambios geoquímicos y geofísicos en los volcanes. Para la operación de estos sistemas se instalan redes sísmicas y de medición de deformaciones y temperatura, se efectúan trabajos de geoquímica de manantiales, emanometría de gases, geología de depósitos de erupciones pasadas, análisis de cenizas y fragmentos volcánicos, etc. El número de métodos empleados para el monitoreo de un volcán depende de los niveles de riesgo asociados a él, su historia eruptiva, su actividad actual y la disponibilidad de recursos económicos, entre otros.

Las dos manifestaciones más importantes de actividad volcánica son los cambios en la microsismicidad y la deformación, ambos debidos al movimiento de magma, a la emisión de gases a alta presión o a la fractura de rocas. Es por ello que los sistemas de monitoreo básicos deben consistir de al menos uno o varios sensores de sismicidad y deformación localizados en el entorno y cerca del cráter del volcán.

1.2 Generalidades Acerca de Deformaciones Volcánicas

Como ya se mencionó, la medición de deformaciones en una zona volcánica activa es de importancia capital para evaluar la actividad en dicha zona. Es por ello que se ha convertido en los últimos años en una de las técnicas más desarrolladas, pues además se ha demostrado que las erupciones volcánicas son precedidas por flujos subsuperficiales de material que pueden ser detectados con mediciones superficiales. Así mismo, se infiere que la magnitud de la deformación que sufre un edificio volcánico es proporcional a la intensidad de la erupción.

El método de Kiyoo Mogi³ para la determinación de las características de la cámara magmática de un volcán asume que dichas cámaras son fuentes puntuales de esfuerzos y que un cambio en el volumen interno es reflejado en la superficie como deformación. Este método ha sido comprobado pues existen mediciones que demuestran que el cuerpo del volcán presenta máxima deformación justo antes del inicio de la expulsión de materiales volcánicos y una vez que los esfuerzos por abrir paso a estos materiales cesan, la superficie volcánica tiende a retornar a su estado previo.

El rango de desplazamientos superficiales es muy amplio. Desde las decenas de metros en procesos de formación de domos, hasta desplazamientos muy pequeños causados por movimientos de masa a gran profundidad, siendo estos últimos los más comunes. Los cambios generalmente se expresan en partes por millón y la experiencia muestra que en muchos volcanes activos estas ocurren en promedio en cantidades menores a 0.1ppm/año. Básicamente las mediciones de deformación consisten en la determinación de desplazamientos horizontales, verticales o inclinaciones entre dos puntos.

1.3 Descripción de las Técnicas más Comunes para la Determinación de Deformaciones

A continuación se describen brevemente algunas de las técnicas de mayor uso en la determinación de deformaciones, cabe aclarar que éstas no sólo se utilizan en volcanes, sino en cualquier otro terreno que se presuma que está sufriendo una deformación.

- *Inclinometría.*

-

Esta técnica se basa en la utilización de instrumentos que miden angularmente el cambio de la inclinación del terreno para medir la deformación de la superficie volcánica. A continuación se describen estos dispositivos.

- *Inclinómetros de Mangueras.*

Son instrumentos que utilizan el nivel de agua en dos recipientes interconectados por medio de una manguera, su aplicación se ve fuertemente afectada por las variaciones de temperatura en la manguera de interconexión. Con un inclinómetro de éste tipo y un extensómetro, el Observatorio Vulcanológico de Sakurajima, Japón ha realizado predicciones exitosas de erupciones, cuyo plazo es menor a dos horas.

- *Inclinómetros Mecánicos y Electrónicos.*

Se han desarrollado un sinnúmero de inclinómetros utilizando la tecnología moderna tanto mecánica como electrónica y telemétrica. Los inclinómetros mecánicos consisten en péndulos horizontales y verticales. Su desventaja es la corta longitud de la base, y por ello son bastante sensibles, no sólo a deformaciones sino también a problemas locales de inestabilidad; sin embargo, al igual que los anteriores están propensos a problemas de sitio. Los modernos inclinómetros electrónicos también son muy sensibles, consisten de un nivel tubular, en cuya burbuja se miden electrónicamente los desplazamientos producidos por el cambio de inclinación.

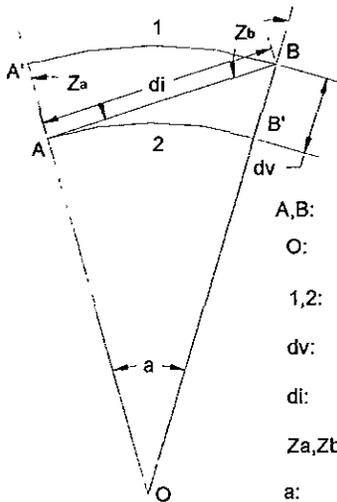
- *Nivelación Geométrica, Directa o de Precisión.*

Nos da la variación de la inclinación de un terreno a través de la determinación de diferencias de elevación entre monumentos permanentes (sitio donde se coloca la estación de medición). Se basa en la colocación de inclinómetros en un arreglo generalmente con forma de triángulo equilátero de 30-60m de lado. La resolución de las ecuaciones del arreglo nos lleva a obtener un vector de inclinación del terreno que se compara con otros vectores obtenidos anteriormente y así se conoce la deformación. La precisión que se puede alcanzar es de 1ppm. En el siguiente esquema se muestra el método gráficamente, τ es el vector de inclinación que se obtiene.

- *Nivelación Trigonométrica o Indirecta.*

La técnica consiste en la medición de una distancia (d_i) y dos ángulos verticales (Z_a, Z_b) en diferentes tramos de una red que suele ser triangular, estos datos se utilizan para calcular la diferencia de alturas entre dos monumentos (A, B) y luego se compara con los resultados obtenidos con anterioridad. A continuación se muestra un esquema en el que se observa el fundamento del método para obtener la diferencia de nivel (dv). Este

método es de mayor rapidez de aplicación que el de nivelación geométrica, sin embargo es de menor precisión, aunque con varias precauciones es posible superar las 5ppm.



- A,B: Monumentos
- O: Centro de la tierra
- 1,2: Superficies de nivel
- dv: Diferencia de nivel
- di: Distancia inclinada
- Za,Zb: Ángulos cenitales
- a: Ángulo AOB

$$dv = di \cdot \frac{Zb - Za}{2} / \cos \frac{a}{2}$$

fig. 1.3.1 Método de nivelación trigonométrica

- **Gravimetría.**

Esta técnica se fundamenta en la medición de los cambios en la fuerza gravitacional, que pueden ser interpretados en términos de desplazamientos verticales del sitio de observación. La exactitud detectada en términos verticales es más baja comparada con la nivelación de precisión en bases cortas, pero con gravimetría las distancias entre puntos de observación no tienen límites.

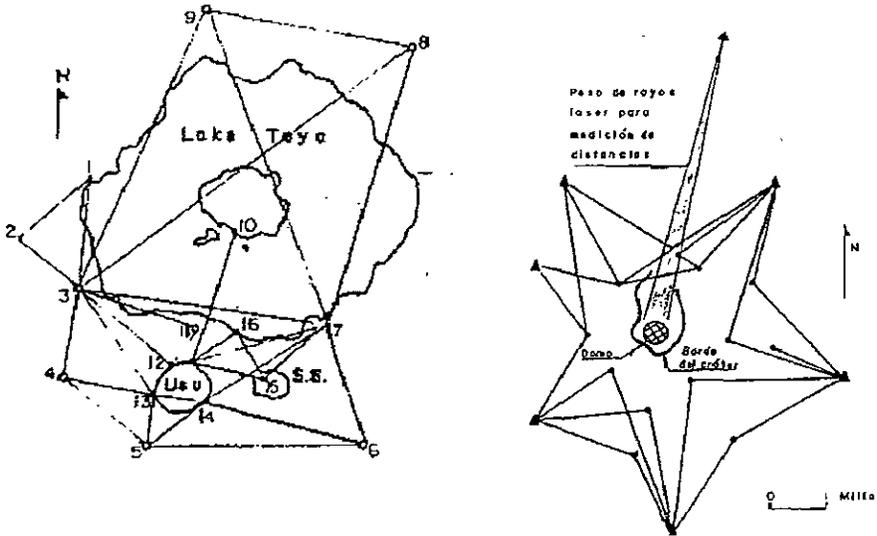
- **Extensometría**

La técnica se basa en la medición de la expansión del terreno que se manifiesta como separación entre las terminales de los extensómetros. Un extensómetro típico utilizado en vulcanología consiste en una barra, tubo o hilo sujeto a la roca por un extremo y a un captador de desplazamiento en el otro. El desplazamiento de la roca se traduce en una variación de la distancia entre el extremo libre del extensómetro y la roca, el captador de desplazamiento da la medida directa de la deformación.

- **Medición de Ángulos y Distancias.**

Consiste en la medición de ángulos y una o dos distancias en cadenas de triángulos que suelen ser conocidas como redes geodésicas, en la figura

siguiente se muestran esquemas de dos redes de éste tipo. Los ángulos se miden con teodolito y las distancias con distanciómetro o cinta invar (cinta metálica graduada de gran longitud para medir distancias sobre terrenos).



Red del Volcán Usu, Japón

Red del Volcán St. Helens, E.U.A.

fig 1.3.2 Dos ejemplos de redes de trilateración

- *Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, GPS)*

El GPS consiste en la medición de distancias desde varios satélites en órbita a Instrumentos o receptores instalados en puntos sobre tierra. La posición de esos puntos es producto de la conversión de las distancias medidas satélite-receptor. Actualmente la exactitud teórica de ésta técnica es de 1ppm en dirección horizontal y de 5-10ppm en la vertical.

Capítulo 2: Aspectos sobre la Medición de las Deformaciones Volcánicas

2.1 Método Empleado en la Actualidad

Con el propósito de hacer una medición más eficiente de las deformaciones en el volcán Popocatepetl, se ha elegido el método de medición de distancias empleando un distanciómetro electrónico (EDM). Para llevar a cabo la medición desde un punto alejado del volcán, se requiere de la colocación de prismas o reflectores sobre su superficie. De esta manera, el haz que es emitido desde el distanciómetro es *reflejado sobre el prisma y se determina la distancia*. La forma en que se hace la medición por el distanciómetro, depende de su modo de funcionamiento, que en el caso del distanciómetro usado en este proyecto es a través del método de pulso⁴. La medición se realiza como se describe a continuación: la señal que es emitida por el instrumento viaja hacia el objetivo y regresa al punto de salida cubriendo dos veces una distancia d . Del tiempo entre la transmisión y la recepción del mismo pulso, la distancia puede calcularse de la siguiente manera:

$$2d = c\Delta t' = c(t_R - t_E) \quad (1)$$

donde:

d : es la distancia entre el instrumento y el objetivo

c : es la velocidad de la luz en el medio

$\Delta t'$ tiempo que tarda la señal en ir al objetivo y regresar al punto de emisión

t_R tiempo de salida del pulso

t_E tiempo de llegada de la señal

De la ecuación anterior, puede verse que la precisión en la medición de la distancia depende de la precisión con la que el tiempo total de desplazamiento de la señal sea medida. Una precisión de 0.1 ns en la medición del tiempo es equivalente a una de 15 mm en la longitud.

En el caso particular del Popocatepetl se instaló una estación de monitoreo que se encuentra en Tlamacas, a una altura de aproximadamente 4000 m. sobre el nivel del mar y a una distancia horizontal de alrededor de 3000 m. Desde este lugar (que aparece en el mapa de la fig. 2.1.1) se estuvieron llevando a cabo las mediciones de las distancias en forma manual usando el método descrito anteriormente, es decir, la toma de las lecturas se realiza en el lugar y se escriben en un registro o tabla. Dichas mediciones pueden presentar variaciones milimétricas o hasta decenas de centímetros, según el comportamiento del volcán.

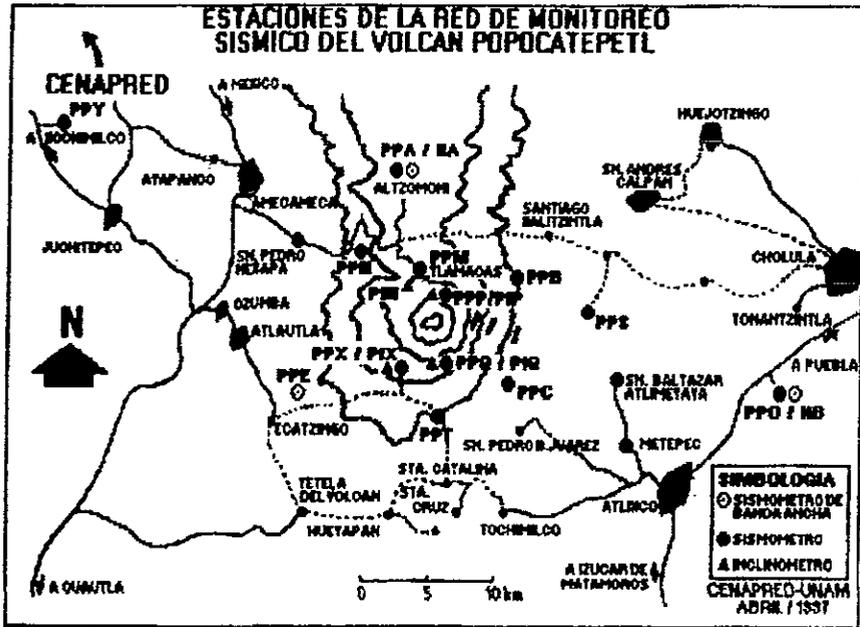


Fig. 2.1.1 Mapa de las estaciones de monitoreo sísmico del volcán Popocatepetl. El recuadro inferior indica la ubicación de los sismómetros e inclinómetros

Las mediciones hechas con distanciómetros electrónicos se ven afectadas por las condiciones que imperan en el ambiente, mismas que influyen en el comportamiento de estos equipos, independientemente de contar con sistemas de autocorrección. Por eso es muy importante contar con registros de temperatura, presión y/o humedad para hacer las correcciones necesarias y de esta manera comprobar la veracidad de los datos obtenidos.

La temperatura y otros factores atmosféricos provocan una curvatura sobre el láser o línea de medición⁵ como producto de la sumatoria de las refracciones atmosféricas, esta curvatura se incrementará en la medida en que se incremente la distancia, especialmente si ésta es oblicua y atraviesa capas atmosféricas a distintas temperaturas.

Para saber la forma en que deben corregirse los errores causados por dichos efectos, es necesario conocer los siguientes parámetros del distanciómetro electrónico: la longitud de onda del emisor (λ) y el índice de refracción (N_s) referido a las condiciones de temperatura y presión estándar del aire seco (0°C y 760 mmHg) con un contenido de 0.03% de bióxido de carbono. Debido a que las condiciones ambientales específicas no coinciden con las del tipo estándar, el índice de refracción tiene que ser calculado para cada caso. Una de las fórmulas adoptadas por International Association of Geodesy y que es ampliamente usada para la obtención de este índice es la siguiente:

$$(N - 1) = \frac{N_g - 1}{1 + \alpha T} \frac{p}{760} - \frac{5.5 \times 10^{-8}}{1 + \alpha T} e \quad (2)$$

donde N es el índice de refracción buscado, p es la presión absoluta, T la temperatura en grados centígrados, e es la presión parcial del vapor de agua en milímetros de mercurio y α es el coeficiente de expansión térmica del aire. Sin embargo, debido a las características propias de los EDM's, es necesario hacer modificaciones a la fórmula anterior.

Por otro lado, cada una de las propiedades anteriores puede ser tratada de manera separada aunque no independiente, esto es con el propósito de analizar específicamente cómo es que influye cada uno de los parámetros durante la medición.

La fórmula de la temperatura para tal efecto es:

$$dN_T = \frac{1}{T^2} \left(-\frac{N_g}{3.709} p + 11.3e \right) dT \quad (3)$$

Una vez que es conocido el índice de refracción, la corrección puede llevarse a cabo haciendo uso de varias ecuaciones. No se debe dejar de lado que éste valor depende de muchos factores que van desde el tipo de distanciómetro empleado hasta la distancia a la cual se va a medir. A este respecto, hay efectos como los de la humedad que deben ser considerados cuando las distancias que van a medirse son superiores a 3 km. y si son oblicuas.

2.2 Interpretación de los Datos de la Medición de Distancia Obtenidos con Distanciómetros Electrónicos.

Luego de la medición en campo la información deberá pasar a la etapa de cálculo cuyo objetivo es determinar magnitudes. Las nuevas lecturas deberán ser comparadas con otras tomadas previamente con la finalidad de obtener desplazamientos en forma de vectores.

Para la interpretación de desplazamientos horizontales o cuasi horizontales se utiliza la expansión - contracción de distancias, representados por medio de vectores. En el caso de las redes geodésicas una forma de interpretación muy importante es el estudio de los esfuerzos de la corteza terrestre, el cual permite definir valores de tensión - compresión, su orientación, el esfuerzo máximo cortante y la dilatación superficial por segmentos o figuras de la red. La conjunción de ambos tipos de datos permiten llegar a mejores conclusiones en la obtención de resultados, además de aportar los criterios básicos para la localización de una fuente de deformación y su tamaño.

Estos desplazamientos, también pueden ser estudiados como series temporales de datos. El uso de estos datos para la elaboración de gráficas como función del

tiempo, toman valor en la determinación de cambios a mediano y largo plazo. Para el estudio en la predicción de erupciones un cambio acelerado en los desplazamientos cuasi horizontales es un indicador de vital importancia.

Estas gráficas son útiles también porque permiten descartar mediciones que no necesariamente representan un desplazamiento. Gracias a éstas es posible diferenciar las medidas reales de aquéllas que son influenciadas por efectos climáticos como la temperatura del aire. El análisis que se realiza consiste en comparar el comportamiento del volcán con los cambios en su volumen, esto es, cuando se registran desplazamientos de cierto orden, ocurren exhalaciones cuya magnitud generalmente varía de manera proporcional a los desplazamientos. Así por ejemplo, de acuerdo a las mediciones previas se puede apreciar como es que el volcán se ha ido deformando (o como es que los reflectores, que están fijos a la superficie del volcán, han cambiado su posición) y en el momento en que se tiene una lectura que rompe con el patrón presentado en mediciones anteriores, ésta puede ser o no tomada en cuenta dependiendo de las lecturas inmediatas.

En la siguiente gráfica se ilustra como es que pueden presentarse este tipo de lecturas.

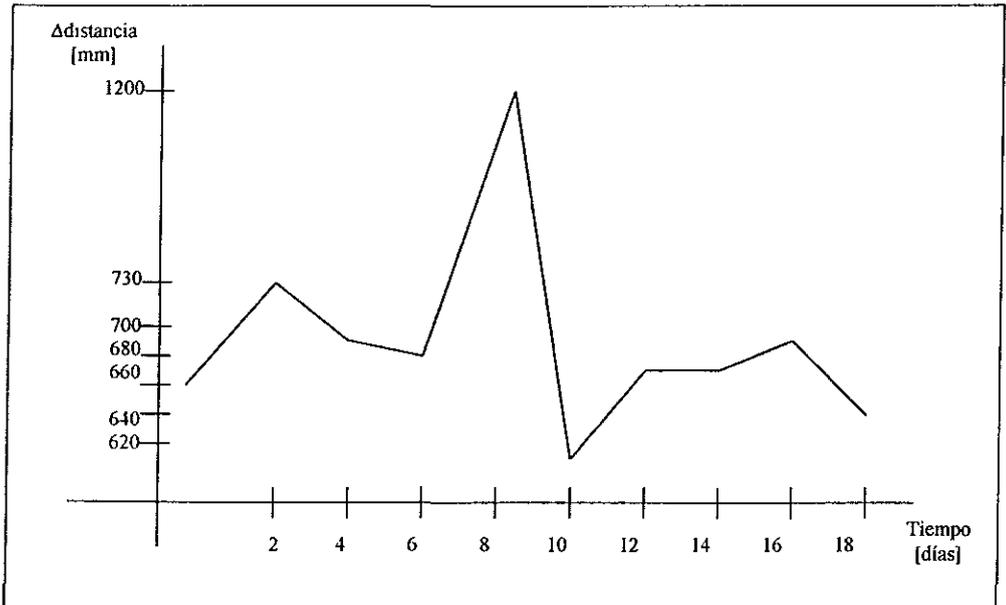


fig. 2.2.1 Ejemplo de una posible gráfica distancia vs tiempo para la interpretación de las distancias medidas.

De acuerdo con la gráfica, para la medición del día 8 tenemos una medición de más de 1000 mm. que supera a la del día anterior en casi 500 unidades. Al compararla con las realizadas durante los siguientes días, eventualmente puede decirse que

con las realizadas durante los siguientes días, eventualmente puede decirse que esta medición se disparó; sin embargo, antes de llegar a tal conclusión es imprescindible verificar dos aspectos principalmente: el primero es que los eventos sucedidos en esos días en el volcán (exhalación de gases por ejemplo) no hayan sido los causantes de semejante desplazamiento, y el segundo, que las variaciones en la temperatura no sean significativas al grado de poder afectar el desempeño del distanciómetro.

Finalmente los datos de la gráfica se ajustan, no solo con el propósito de tener una mejor estimación de la medida correspondiente al dato que se encuentra fuera de orden, sino también como un predictor en el comportamiento de las deformaciones del volcán. Para lograr lo anterior, la gráfica que resulta del ajuste de los datos se correlaciona con modelos de deformación volcánica tales como el de Mogi y Yokoyama, los cuales se explicarán en la sección 2.5 de este capítulo.

2.3 Comparación con otros Sistemas

Las principales ventajas que presenta el método de medición de distancias con distanciómetro electrónicos, respecto a los demás que se describieron en el primer capítulo son el costo y el tiempo que toma la obtención de las lecturas, que en el caso del EDM RED2L de Sokkia es de alrededor de 6s. una vez que el sistema está en posición.

Por otro lado, este sistema al igual que otros del tipo electrónico, tiene el defecto de ser influenciado por condiciones ambientales, por lo que al no tener conocimiento sobre las correcciones que deben aplicarse en cada caso, la interpretación de los datos puede volverse errónea.

En la siguiente tabla se hará una comparación de las características comunes que existen entre los sistemas.

Nivelación geométrica	Nivelación Trigonométrica	Inclinometría mecánica y electrónica	Gravimetría	Extensometría	Medición de distancias	Global Position System (GPS)
Dispositivos empleados: Nivel de precisión, miras invar, inclinómetro de caras planas, parasol en el tripode. Precisión: 1 ppm	Dispositivos empleados: Distanciómetro electrónico, teodolito de precisión Precisión: Superior a 5 ppm	Dispositivos empleados: Mecánicos (péndulos horizontales) Electrónicos (nivel tubular de burbuja) Precisión: 5 ppm	Dispositivos empleados: Gravímetros	Dispositivos empleados: Extensómetros	Dispositivos empleados: Distanciómetro Electrónico y reflectores Precisión: 3 ppm	Dispositivos empleados: Satélites en órbita y receptores Precisión: 5 - 10 ppm

Tabla 2.3.1 Comparación entre los sistemas para monitorear deformaciones

2.4 Justificación del Diseño

Las ventajas de tener un sistema que sea capaz de recabar datos en tiempo real o prácticamente real es de suma importancia en casos en los que la vida de las personas está en riesgo, como lo es el del monitoreo de un volcán que permanece activo. A continuación se enuncian algunas de las ventajas que representa contar con dispositivos de este tipo.

- Evita el hecho de tener que arriesgar la vida de una persona para llevar a cabo este monitoreo desde una estación que se encuentra en el área de peligro de un volcán activo.
- El número de mediciones o muestras que pueden realizarse no depende de la presencia de alguna persona y pueden hacerse a cualquier hora el día o de la noche. Gracias a esto es posible lograr una detección de deformaciones de corta duración.
- Por otro lado, sería un gasto inútil tener que transportarse diariamente al sitio para la toma de las lecturas, por lo que desde el punto de vista económico, la inversión puede ser recuperada en un lapso de tiempo corto, comparado con el que se va a emplear durante el monitoreo.
- En el caso particular del sistema propuesto en este proyecto, no es importante conocer con exactitud la magnitud de la distancia entre el EDM y el punto de medición, sino más bien las variaciones de la misma. Debido a lo anterior y considerando que el proceso es repetitivo (obteniendo un número suficiente de muestras) los errores no sistemáticos (lecturas erróneas provocadas por perturbaciones atmosféricas) que pueden acarreararse durante la medición son reducidos estadísticamente.
- Cuando el láser no es reflejado, no se registra lectura alguna, lo cual significa que el prisma no se encuentra en la posición en la que estaba hasta la realización de la última medición, por lo que es necesario rotar el distanciómetro en dos ejes hasta que se reciba la señal. Este movimiento tiene que ser de mucha precisión, por lo que hacerlo manualmente implica una pérdida de tiempo, el cual se incrementa de manera proporcional al número de reflectores colocados sobre la superficie del volcán.
- La magnitud de los ángulos de rotación del distanciómetro son del orden 10° , con una precisión de $\pm 1/60$ de grado, la cual difícilmente puede lograrse en forma manual sin la utilización de algún instrumental.

Por estas razones y con el propósito de poder realizar las mediciones sin tener la presencia física de alguna persona en la estación de monitoreo se tomó la decisión de diseñar un sistema automatizado capaz de hacer estas mediciones en tiempo real a una hora determinada y en cualquier otro momento, de enviar las lecturas al centro de monitoreo a 62 km. del sitio desde el cual se hace la medición y de almacenar los datos para ser analizados posteriormente.

2.5 Modelos de Deformación Adoptados en otros Volcanes

Con base en las erupciones de diferentes volcanes, científicos en el área geofísica han trabajado en la elaboración de modelos matemáticos que permitan relacionar mediciones de desplazamientos verticales y radiales con la deformación. Particularmente podemos hablar de los estudios precursores realizados sobre el volcán Sakurajima en el año de 1914⁶, los cuales se fundamentan en mediciones obtenidas en campo.

Gracias a los datos de deformación superficial obtenidos durante la erupción de este volcán, fue posible establecer lo siguiente: es posible interpretar la deformación de la superficie por medio de un modelo basado en dos fuentes de presión una de ellas vertical y cerca del cráter, con una longitud de 2 km y la otra profunda y oblicua con una distancia de 8 km.

Partiendo de las afirmaciones anteriores se pudo concluir que el centro de presiones podría permanecer en una fuente más profunda cerca del volcán y que los cambios de presión darían como resultado una deformación en la superficie. La depresión y recuperación de la superficie sugieren la presencia de una presión concentrada o una reserva de magma cerca del volcán.

Con base en el desarrollo en los estudios en el área y haciendo un análisis más minucioso sobre el caso del volcán Sakurajima, en 1958, Mogi fue el primero en aplicar la teoría de la elasticidad a los datos de deformación observados en varios volcanes. Él comparó la relación entre los desplazamientos y la distancia radial de la fuente de presión con las curvas maestras, para las fuentes de presión explosivas o implosivas calculadas por Yamakawa en 1955. Este modelo es expresado en armónicos esféricos $P_0^0(\cos \theta)$ y es simétrico alrededor del origen. Los desplazamientos en la superficie están dados por:

$$\text{radial: } \Delta d = \frac{3a^3 P}{4\mu} \frac{R}{(f^2 + R^2)^{3/2}} \quad (4)$$

$$\text{vertical: } \Delta h = -\frac{3a^3 P}{4\mu} \frac{f}{(f^2 + R^2)^{3/2}} \quad (5)$$

donde P denota la amplitud de la presión, μ la rigidez de la corteza, f la profundidad de la fuente de presión, a es el radio de la esfera, y R es la distancia radial sobre la superficie desde la fuente que está localizada cerca del máximo desplazamiento vertical. Para la obtención del modelo anterior debe cumplirse que:

$$\frac{R}{f} = \frac{a}{a}$$

Con esto Mogi concluyó que la depresión observada en el volcán Sakurajima durante la erupción de 1914 había sido causada por un rápido decremento de la presión en la fuente esférica.

En 1971, el modelo elaborado por Yokoyama plantea que la fuente de presión debe ser expresada por el armónico esférico P_1^0 ($\cos \theta$). Este modelo es caracterizado por una fuerza unidireccional provocada por el movimiento del magma.

Los desplazamientos en la superficie debidos a la fuente de presión de este modelo tienen un eje vertical como referencia:

$$\begin{aligned} \text{radial: } \Delta d &= \frac{a^2 P}{18\mu} \left[\frac{6FR}{(F^2 + R^2)^{3/2}} - \frac{3\left\{F - (F^2 + R^2)^{1/2}\right\}}{R(F^2 + R^2)^{3/2}} \right] \\ & - \frac{a^4 P}{126\mu} \left[\frac{19FR}{(F^2 + R^2)^{5/2}} - \frac{2R}{F(F^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{2}{F^2} \frac{F - (F^2 + R^2)^{1/2}}{R(F^2 + R^2)^{3/2}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{vertical: } \Delta h &= \frac{a^2 P}{6\mu} \left[\frac{3}{(F^2 + R^2)^{1/2}} - \frac{2F^2}{R(F^2 + R^2)^{3/2}} \right] \\ & - \frac{a^4 P}{6\mu} \left[\frac{2}{7F^2} - \frac{1}{(F^2 + R^2)^{1/2}} + \frac{2}{7} \frac{1}{(F^2 + R^2)^{3/2}} - \frac{5}{21} \frac{2F^2 - R^2}{(F^2 + R^2)^{5/2}} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

siendo la misma notación que en las ecuaciones anteriores y donde F denota la profundidad de la fuente. Con ello, Yokoyama concluyó que la depresión había sido causada por un rápido decremento en la presión a una profundidad de 6 km.

Además de estos modelos, han habido otros cuyo principio está basado en asumir un medio viscoelástico o que las fuentes de presión tienen formas distintas a una esfera. Ejemplos de ello han sido desarrollados por Swanson et. al, quien afirma que este tipo de análisis sólo proporcionan estimaciones muy superficiales ya que la fundamentación se basa en situaciones ideales y no se toma en cuenta por completo, la complejidad de la deformación de la superficie. Por esta razón es preferible basarse en modelos más simples pero que permitan hacer un análisis más cercano a lo que ocurre en la realidad.

Capítulo 3: Diseño del Sistema

3.1 Planteamiento del Sistema

Para tener un resultado más cercano a la magnitud de las deformaciones del volcán se coloca una red de prismas sobre su superficie, en los lugares donde se espera que las deformaciones sean máximas de acuerdo al modelo de Mogi. Su ubicación final también depende de la accesibilidad a dichos lugares. Estos prismas son los que se encargan de reflejar el láser de manera paralela al ángulo de incidencia del mismo desde el punto en el cual es emitido.

Como dispositivo de movimiento se diseñará un soporte en forma de "U" con las características estructurales necesarias para evitar algún tipo de deformación por cargas estáticas y dinámicas. Sobre el soporte se colocará el distanciómetro, el cual se moverá por medio de dos motores ubicados en la base para controlar el movimiento azimutal y otro de manera perpendicular para el ángulo de elevación. El distanciómetro entonces rotará en estos dos ejes la cantidad necesaria de grados hasta encontrar los prismas. A su vez, dicho soporte se colocará sobre un tripié de acero que irá empotrado al piso. Esto mantendrá en la misma posición y en la medida de lo posible evitará que el distanciómetro pierda su posición en caso de que por efecto de la temperatura el tripié sufra deformación.

El sistema se comunicará desde la Ciudad de México (CENAPRED) con la estación "Tlamacas" por medio de radiomódems.

Los elementos básicos que lo conforman son:

- Distanciómetro electrónico (EDM).
- Soporte para el movimiento del EDM.
- Base para el soporte.
- Ventana automática.
- Computadora personal.
- Radiomódem.
- Caseta o estación.

En las siguientes secciones se verá a detalle el diseño de cada elemento y la manera en que se conjuntan cada uno de ellos.

3.2 Sistema Mecánico

El desarrollo matemático de la dinámica del sistema es necesario por dos razones fundamentalmente, la primera de ellas tiene que ver con la selección de los aditamentos que conformarán al sistema y la segunda con el diseño del controlador, por lo que es de vital importancia conocer su desempeño. Para ello se incluye un análisis basado en la dinámica del cuerpo rígido en tres dimensiones⁷ con el que va a ser posible establecer las ecuaciones que sirven para describir el comportamiento

de dicho sistema, el cual está conformado por un soporte en forma de "U" y dos ejes de giro.

3.2.1 Cinemática

A pesar de que los desplazamientos angulares no serán demasiado grandes ni constantes, sí deben ser muy precisos por lo que es de suma importancia conocer estos datos para lograr el diseño de un buen controlador.

De acuerdo con la siguiente figura 3.2.1.1, ubicaremos los marcos de referencia absoluto y relativo así como también los ejes respecto a los que girará el distanciómetro.

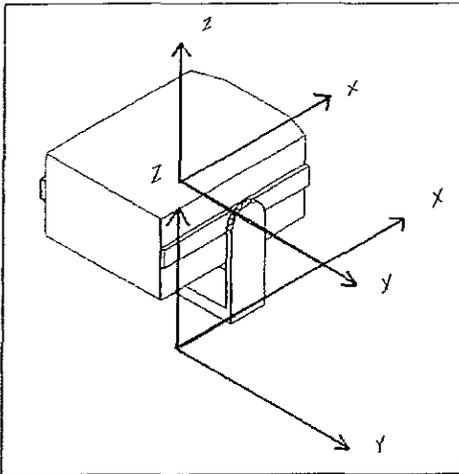


fig. 3.2.1.1 Ubicación de los sistemas de referencia absoluto y relativo sobre el distanciómetro.

Se define entonces a X, Y, Z como el sistema de referencia absoluto y a x, y, z como el sistema de referencia relativo o móvil. De acuerdo a las flechas, el distanciómetro gira alrededor del eje y , mientras que el soporte lo hace respecto a Z .

De acuerdo a la influencia que ejerce cada una de éstas sobre el objeto, puede decirse entonces que la velocidad del sistema es la que actúa en el eje Z (Ω_{sis}), ya que provoca que tanto el soporte como el distanciómetro se desplacen angularmente al mismo tiempo. Luego entonces, la velocidad particular o relativa es la que actúa en el eje y (ω_{rel}), debido a que dentro del sistema solamente influye en el movimiento del distanciómetro sin modificar la del soporte.

Una vez que son definidas las velocidades, entonces se puede escribir la primera ecuación cinemática, referente al desplazamiento de la parte frontal del distanciómetro respecto al eje de giro del soporte.

$$\vec{R}_f = \vec{r}_o + \vec{r}_f \quad (1)$$

donde:

R_f : es el vector que define la posición del extremo del distanciómetro respecto al marco de referencia absoluto.

\bar{r} es el vector que va desde el marco de referencia absoluto al móvil.

\bar{r}_o es el vector que define la posición del distanciómetro respecto al marco de referencia móvil.

$$\bar{r} = O_f \left[\cos(\theta_x) \cos(\theta_z) \hat{i} + \cos(\theta_x) \text{sen}(\theta_z) \hat{j} + \text{sen}(\theta_x) \hat{k} \right]$$

θ_x : desplazamiento angular en el eje x

θ_z : desplazamiento angular en el eje z

O_f es la magnitud del vector \bar{r}_{f_o} .

Al derivar la ecuación (1) se obtenemos la velocidad del sistema:

$$\dot{R}_f = \dot{\bar{r}}_o + \Omega_{sist} \times \bar{r}_{f_o} + \dot{\bar{r}}_{f_o} \Big|_{rel} \quad (2)$$

$$\dot{R}_f = \dot{\bar{r}}_o + \Omega_{sist} \times \bar{r}_{f_o} + \omega_{rel} \times \bar{r}_{f_o} + J(\bar{r}_{f_o}) \dot{\bar{r}}_{f_o}^a \quad (3)$$

donde:

$\dot{\bar{r}}$ es la variación del vector respecto al tiempo.

Ω_{sist} : es la velocidad angular del sistema (respecto al sistema absoluto).

ω_{rel} : es la velocidad angular relativa (respecto al marco de referencia móvil).

$J(\bar{r}_{f_o})$: es el jacobiano del vector \bar{r}_{f_o} .

$\dot{\bar{r}}^a$: es la variación del vector \bar{r}_{f_o} respecto al tiempo sin la influencia de las velocidades angulares que componen al sistema (velocidad propia de ese punto).

Para este caso específico y de acuerdo a la ubicación de los sistemas de referencia la correspondencia de los términos de la ecuación (3) son los siguientes:

$\dot{\bar{r}}_o$ es igual a cero, ya que se mantiene constante.

$\Omega_{sist} = \Omega_z \hat{k}$ (velocidad angular a la que giran el soporte y el distanciómetro respecto al eje Z).

$\omega_{rel} = \omega_y \hat{j}$ (velocidad angular a la que se desplaza el distanciómetro respecto al marco de referencia relativo sobre el eje y).

$\dot{\bar{r}}_{f_o}^a$ es igual a cero, ya que en este caso particular la velocidad del punto f solo depende de las velocidades angulares que conforman el sistema.

Por lo tanto, la ecuación total para la velocidad está dada por:

$$R_t = \Omega_z \hat{k} \times O_t^i \left[\cos(\theta_x) \cos(\theta_z) \hat{i} + \cos(\theta_x) \text{sen}(\theta_z) \hat{j} + \text{sen}(\theta_x) \hat{k} \right] + \omega_z \hat{j} \times O_t^i \left[\cos(\theta_x) \cos(\theta_z) \hat{i} + \cos(\theta_x) \text{sen}(\theta_z) \hat{j} + \text{sen}(\theta_x) \hat{k} \right] \quad (4)$$

La aceleración la obtenemos a partir de la siguiente ecuación:

$$\ddot{\vec{R}}_t = \dot{\vec{\Omega}}_{sist} \times \vec{r}_{j_o} + \vec{\Omega}_{sist} \times (\vec{\Omega}_{sist} \times \vec{r}_{j_o}) + 2\vec{\Omega}_{sist} \times \dot{\vec{r}}_{j_o} \Big|_{rel} + \ddot{\vec{r}}_{j_o} \Big|_{rel} \quad (5)$$

$$\ddot{\vec{r}}_{j_o} \Big|_{rel} = \ddot{\vec{r}}_{j_o} + \dot{\vec{\omega}}_{rel} \times \vec{r}_{j_o} + \vec{\omega}_{rel} \times (\vec{\omega}_{rel} \times \vec{r}_{j_o})$$

$\vec{r}_{j_o}^0$ es igual a cero debido a que la velocidad es nula.

Y los términos del sistema correspondientes a la ecuación (5) son:

$$\dot{\vec{\Omega}}_{sist} \times \vec{r}_{j_o} = -\dot{\Omega}_z r_{j_o,y} \hat{i} + \dot{\Omega}_z r_{j_o,x} \hat{j}$$

$$\vec{\Omega}_{sist} \times (\vec{\Omega}_{sist} \times \vec{r}_{j_o}) = -\Omega_z^2 r_{j_o,x} \hat{i} - \Omega_z^2 r_{j_o,y} \hat{j}$$

$$2\vec{\Omega}_{sist} \times \dot{\vec{r}}_{j_o} \Big|_{rel} = 2\Omega_z \omega_z r_{j_o,z} \hat{j}$$

$$\dot{\vec{\omega}}_{rel} \times \vec{r}_{j_o} + \vec{\omega}_{rel} \times (\vec{\omega}_{rel} \times \vec{r}_{j_o}) = (\dot{\omega}_z r_{j_o,z} - \omega_z^2 r_{j_o,y}) \hat{i} - (\dot{\omega}_z r_{j_o,x} + \omega_z^2 r_{j_o,z}) \hat{k}$$

El cálculo de las velocidades y aceleraciones angulares estará definidos por medio de un perfil de velocidades de quinto grado, el cual se define a partir de la magnitud del ángulo de desplazamiento total (θ_f) de la siguiente manera:

$$\theta(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

$$\dot{\theta}(t) = \sum_{i=0}^5 i a_i t^{i-1} = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4$$

$$\ddot{\theta}(t) = \sum_{i=0}^5 a_i (i^2 - i) t^{i-2} = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3$$

siendo las condiciones las siguientes:

Para $t = 0$

$$\theta(0) = 0, \dot{\theta}(0) = 0, \ddot{\theta}(0) = 0$$

En las siguientes condiciones, llamaremos t_f al tiempo final de la trayectoria y a v_f la posición final.

Para $t = t_f$

$$\theta(t_f) = v_f, \dot{\theta}(t_f) = 0, \ddot{\theta}(t_f) = 0$$

Para $t = t_f/2$

$$\dot{\theta}(t_f/2) = v_f/2, \ddot{\theta}(t_f/2) = v_{max} \cdot \ddot{\theta}(t_f/2) = 0$$

A continuación, de acuerdo con las condiciones iniciales, se determinarán los coeficientes para cada una de las ecuaciones.

Para $t = 0$ se tiene entonces:

$$\theta(0) = a_0 \quad \therefore \quad a_0 = 0$$

$$\dot{\theta}(0) = a_1 \quad \therefore \quad a_1 = 0$$

$$\theta(0) = 2a_2 \quad \therefore \quad 2a_2 = 0$$

$$\text{Para } t = t_f, \theta(t_f) = \theta_f, \dot{\theta}(t_f) = 0, \ddot{\theta}(t_f) = 0$$

$$\theta_f = a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5$$

$$0 = 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4$$

$$0 = 6a_3 t_f + 12a_4 t_f^2 + 20a_5 t_f^3$$

$$\text{Para } t = t_f/2, \theta(t_f/2) = s_f/2, \dot{\theta}(t_f/2) = \dot{\theta}_{max}, \ddot{\theta}(t_f/2) = 0$$

Con el propósito de obtener el valor de los coeficientes escribimos las ecuaciones anteriores en su forma matricial.

$$Ax = B$$

$$\begin{bmatrix} t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$x = A^{-1}B$$

Haciendo las operaciones necesarias para obtener la inversa de la matriz A y premultiplicando en ambos lados de la ecuación se obtiene:

$$a_3 = 10 \left(\frac{s_f}{t_f^3} \right), \quad a_4 = -15 \left(\frac{s_f}{t_f^4} \right); \quad a_5 = 6 \left(\frac{s_f}{t_f^5} \right)$$

Finalmente, se sustituyen estos valores de los coeficientes en las ecuaciones cinemáticas para tenerlas en su forma paramétrica.

$$\theta(t) = \theta_f \left[10 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 \right] \quad (6)$$

$$\dot{\theta}(t) = \theta_f \left[30 \frac{t^2}{t_f^3} - 60 \frac{t^3}{t_f^4} + 30 \frac{t^4}{t_f^5} \right] \quad (7)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \theta_f \left[60 \frac{t}{t_f^3} - 180 \frac{t^2}{t_f^4} + 120 \frac{t^3}{t_f^5} \right] \quad (8)$$

Las ecuaciones anteriores sirven para determinar ambos ángulos, tanto el de la velocidad relativa como el de la velocidad del sistema (ω_y y Ω_z respectivamente). Los resultados se obtendrán a partir de la sustitución de incrementos de tiempo constantes y estos valores se emplearán en las ecuaciones (1), (4) y (5) y de esta manera se resolverá la cinemática del sistema.

3.2.2 Dinámica

Basándose en las condiciones cinemáticas definidas anteriormente, a continuación, se determinarán las reacciones que actúan sobre el soporte del distanciómetro, así como también los momentos angulares que se presentan durante su desplazamiento. De esta manera será posible determinar los torques necesarios para la selección de los motores.

A continuación se presenta una figura en la que se ilustra la ubicación de los motores.

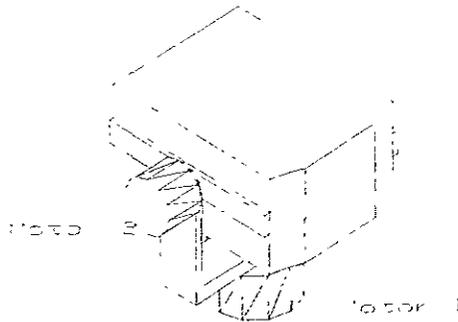


Fig 3.2.2.1 Ubicación de los actuadores respecto al distanciómetro.

Basándose en la mecánica de Newton - Euler ⁸ para el cálculo de las reacciones, inicialmente se calculan las fuerzas debidas a las aceleraciones empleando el proceso hacia adelante. Posteriormente se obtendrán las reacciones sobre los actuadores (proceso hacia atrás) de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$F_{i+1}^{y+1} = m_{i+1} a_{c_{i+1}}^{i+1} \quad (8)$$

$$f_i' = R_{i+1}' f_{i+1}^{i+1} + F_i' \quad (9)$$

donde F es la fuerza debida a la aceleración del centro de masa (a_c) de cada elemento, que en este caso son el soporte y el distanciómetro, y f es la reacción que se presenta en cada actuador. R es la rotación de ejes entre un sistema de referencia y otro.

Haciendo una igualdad entre los momentos interno y externos que se presentan en el sistema, se calculan inicialmente los momentos internos mediante la ecuación de Euler para el momentum angular:

$$M_i = \frac{\partial H_g}{\partial \dot{a}} - \Omega_{sist} \times \omega_{iel} I \quad (10)$$

donde H_g es el momentum angular e I es la matriz de inercias.

La ecuación anterior la puede enunciarse también de la siguiente manera:

$$N_{i-1}^{i-1} = I \dot{\omega}_{i-1}^{i-1} + \omega_{i-1}^{i-1} \otimes I \omega_{i-1}^{i-1} \quad (11)$$

Finalmente, los torques se calculan de la siguiente manera:

$$n_i^i = R_{i+1}^i n_{i+1}^{i+1} + N_i^i + C_i^i \otimes F_i^i + I_{i+1}^i \otimes R_{i+1}^i f_{i+1}^{i+1} \quad (12)$$

Para obtener los valores de los parámetros de diseño se plantea la siguiente condición de desplazamiento angular sobre ambos ejes del sistema.

De 0 a 30° en el eje **Z**.

De 0 a 15° en el eje **y**.

En un tiempo total de 3 s.

Con los datos anteriores, se llevarán a cabo los cálculos (en incrementos de 0.25 s) en cada una de las ecuaciones descritas anteriormente, hasta la obtención de los torques para ambos motores.

La razón de elegir estos valores, es porque se trata de los extremos o límites de desplazamiento del sistema, es decir, el distanciómetro no rotará más de 15° en el eje **y** ni más de 30° en el eje **Z**. De esta manera, tendremos una idea clara de como será su comportamiento y podrá llevarse a cabo la selección del equipo que va a conformar al sistema.

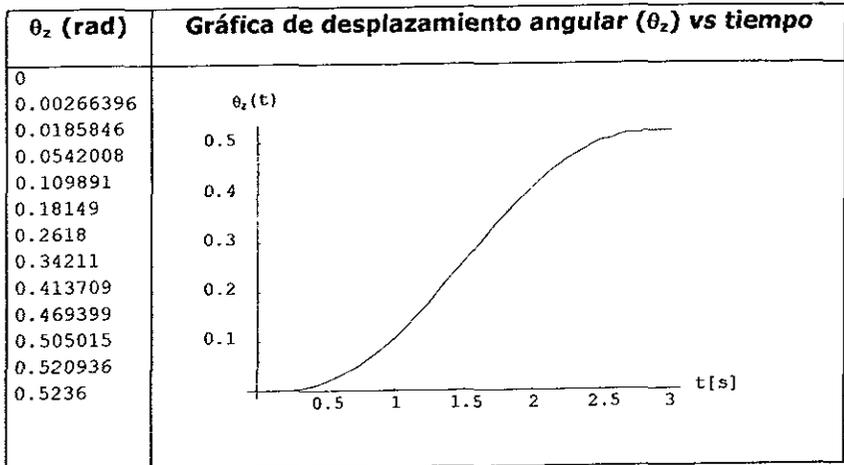
3.2.3 Resultados de la dinámica del sistema

A continuación se presentan los resultados de la cinemática del sistema para una rotación de 30° en el eje **Z** y de 15° sobre el eje **Y**, considerando que la posición final se alcanzará en un tiempo total de 3 s.

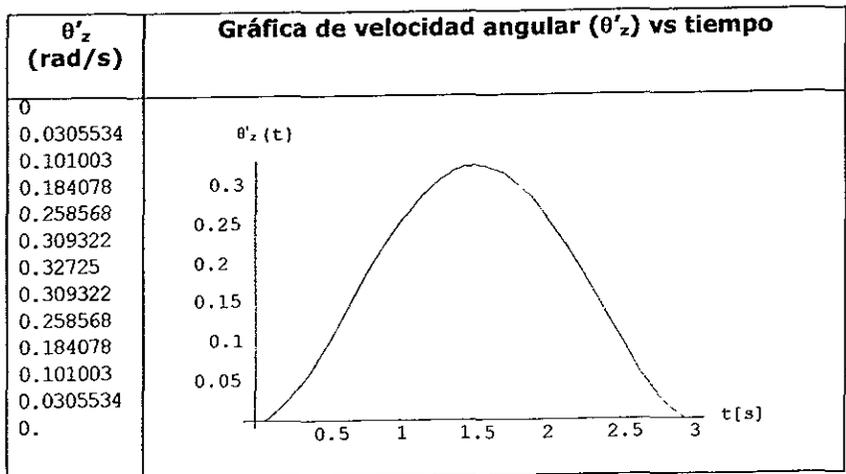
En cuanto a la dinámica, se presenta la gráfica con los resultados correspondientes a los torques necesarios en cada motor.

Los resultados de todas las gráficas se presentan en incrementos de 0.25 s, dando un total de 13 datos, de manera que el dato que aparece al inicio de una columna o renglón corresponde al tiempo 0, el segundo a 0.025 así sucesivamente.

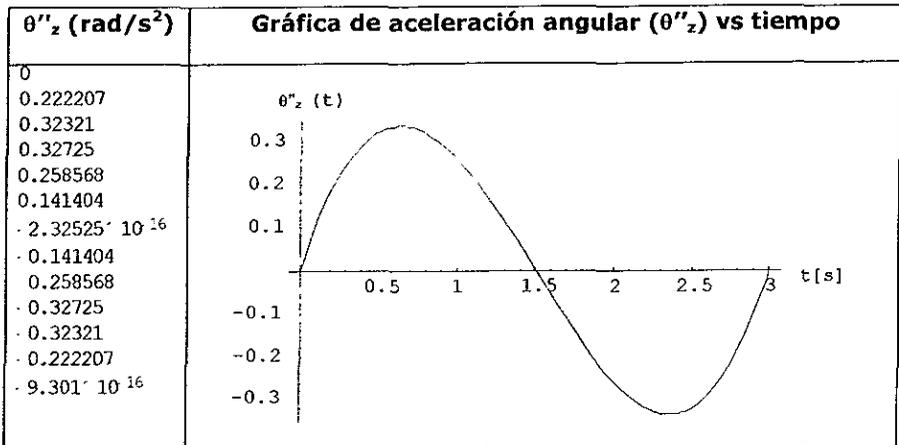
Datos para el movimiento sobre el eje Z



Gráfica 3.2.3.1

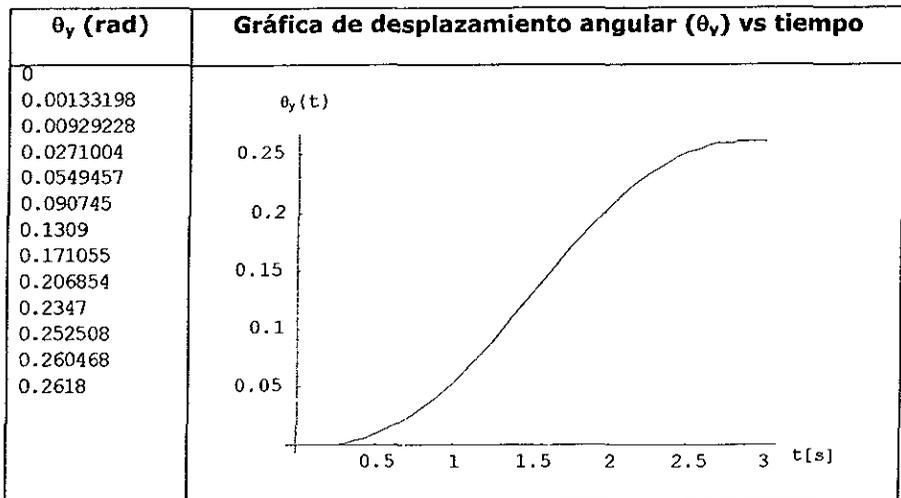


Gráfica 3.2.3.2

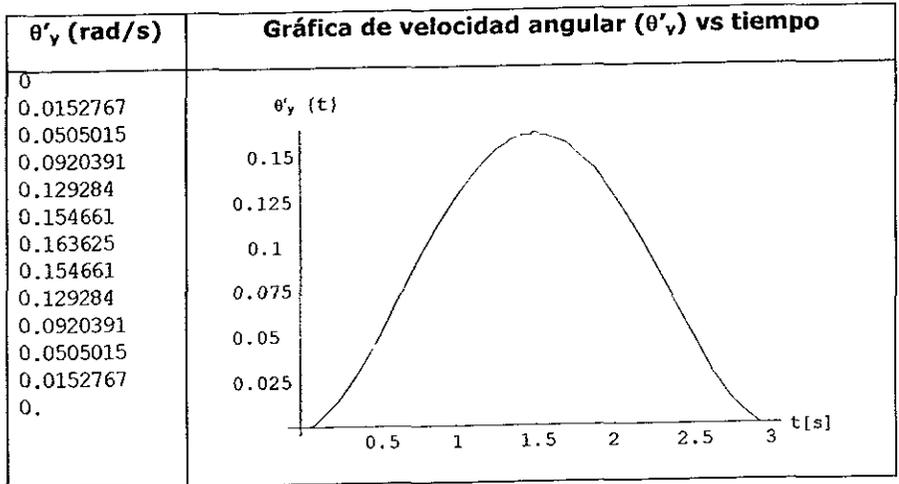


Gráfica 3.2.3.3

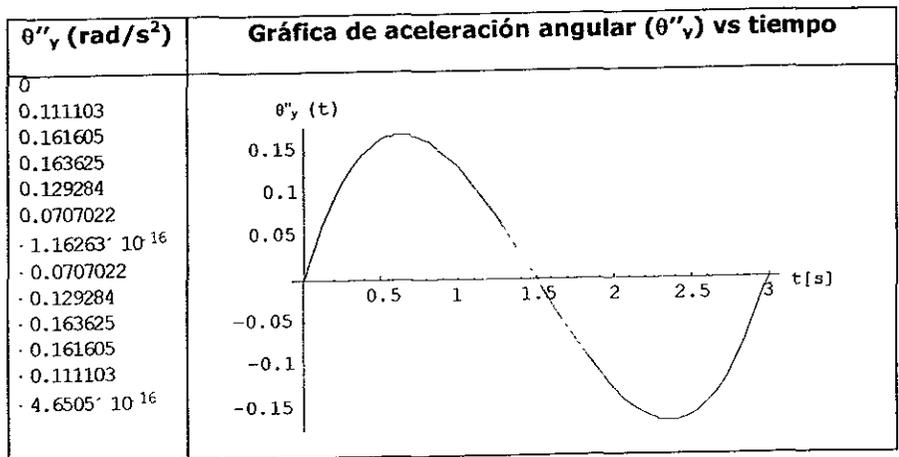
Datos para el movimiento en el eje y



Gráfica 3.2.3.4

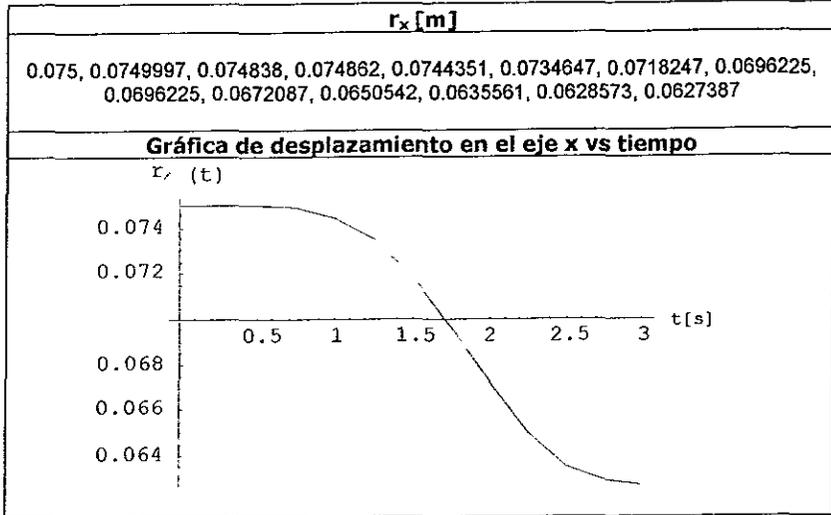


Gráfica 3.2.3.5

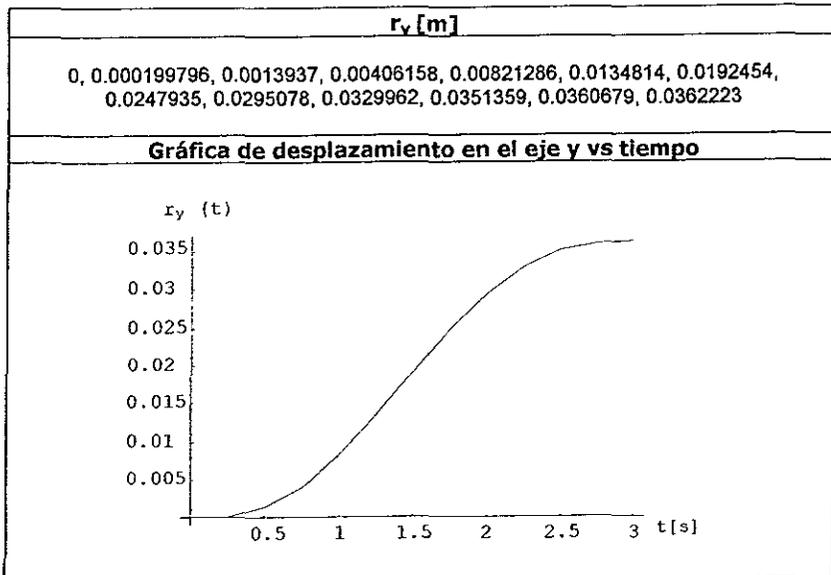


Gráfica 3.2.3.6

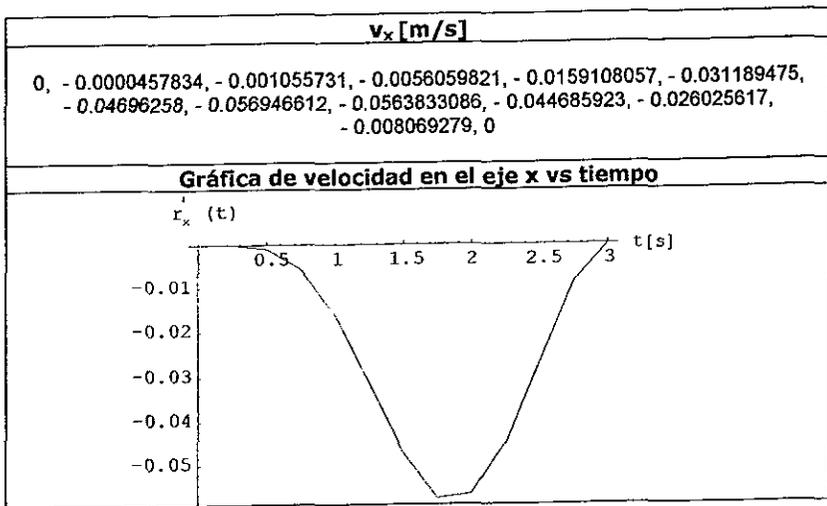
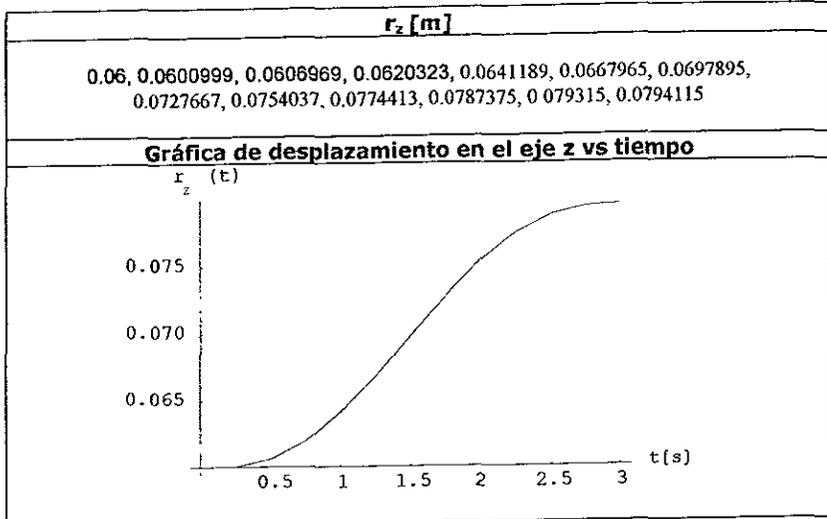
Ahora se verán los resultados correspondientes a los cálculos de desplazamiento, velocidad y aceleración tangenciales. En cada caso la elaboración de las gráficas es independiente para cada eje (**X, Y, Z**), es decir, que cada una de las componentes se ilustra por separado ($r_x(t)$ vs $t(s)$, $r_y(t)$ vs $t(s)$, etc.)

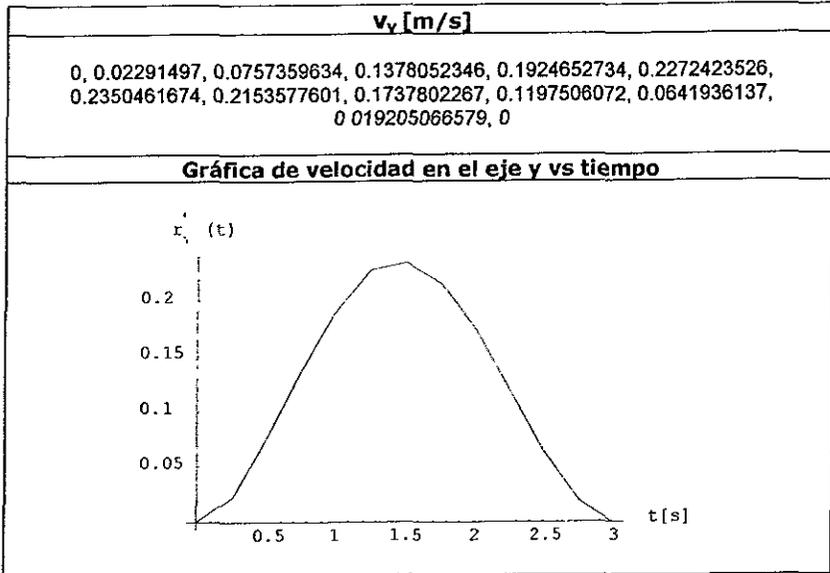


Gráfica 3.2.3.7

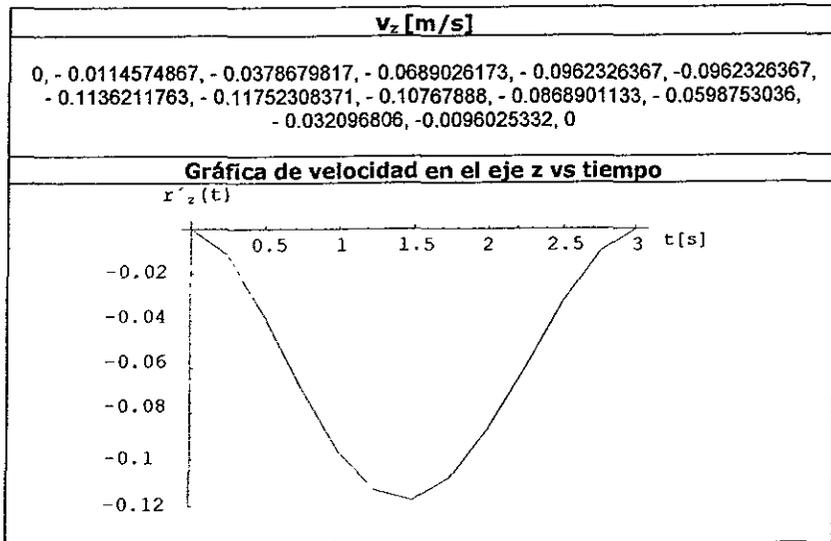


Gráfica 3.2.3.8

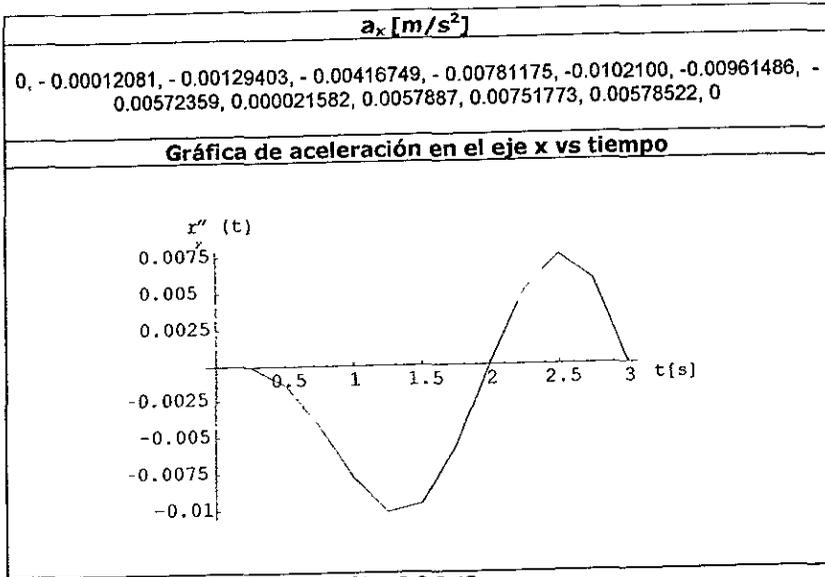




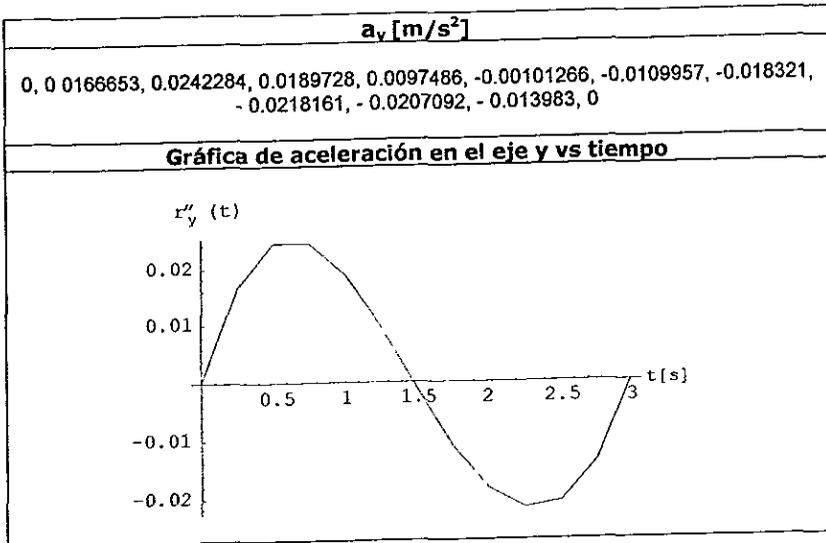
Gráfica 3.2.3.11



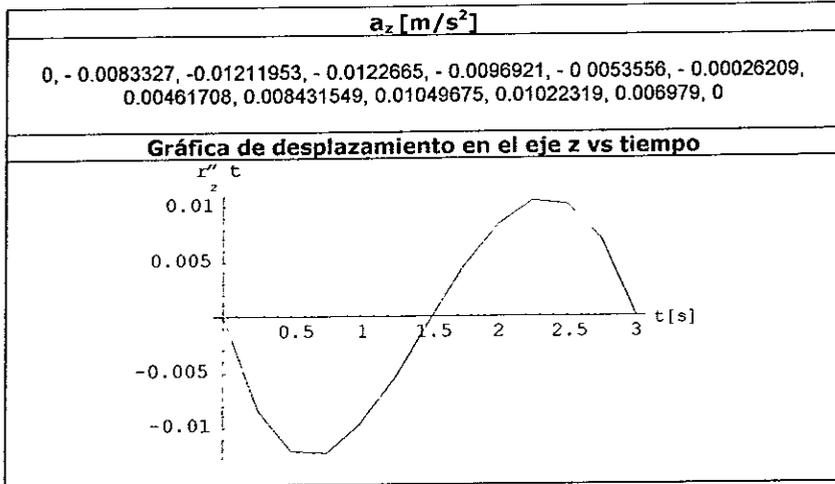
Gráfica 3.2.3.12



Gráfica 3.2.3.13

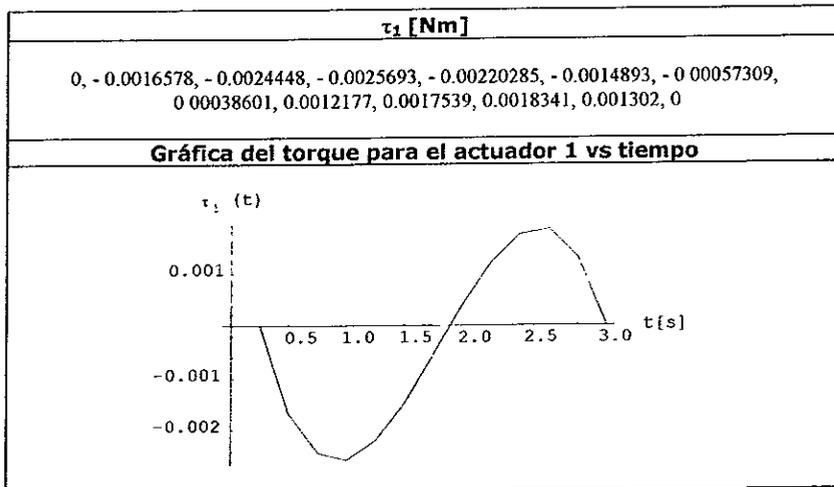


Gráfica 3.2.3.14

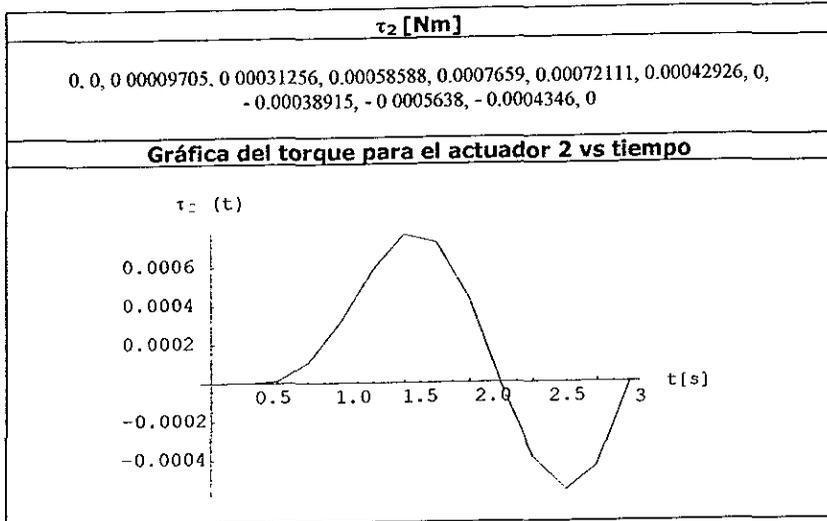


Gráfica 3.2.3.15

Finalmente se presentan las gráficas del torque para ambos actuadores, siendo τ_1 la magnitud correspondiente al motor cuyo giro es respecto a **Z** y τ_2 el que gira respecto a **Y**.



Gráfica 3.2.3.16



Gráfica 3.2.3.17

Respecto a estas últimas dos gráficas cabe señalar que los torques negativos se deben a que los datos de la gráfica corresponden a los vectores en los ejes correspondientes a cada eje por lo que los valores negativos se deben al cambio en la dirección del giro.

3.2.4 Diseño de una Ventana Automática para la Operación del Sistema.

Debido a que el EDM debe tener línea de vista libre hasta los prismas y a que se necesita proteger el equipo mientras no se esté midiendo, se decidió implementar una ventana que al momento de medir permanezca abierta y el resto del tiempo cerrada; se contemplaron varias configuraciones como son: ventana circular con movimiento radial similar a un diafragma de cámara fotográfica, ventana rectangular de una y dos hojas con movimiento horizontal, ventana rectangular de una y dos hojas con movimiento vertical, además de una ventana cuadrada de una y dos hojas, y de movimientos verticales y horizontales; se descartaron las configuraciones de movimiento vertical y de doble hoja corrediza debido a que requerían mayor fuerza motriz, también se descartó el de apertura radial debido a su complejidad. Se llegó a la configuración de una ventana rectangular con dos hojas móviles, pero sólo una de ellas automática y corrediza, y la otra hoja abatible hacia el exterior en forma manual.

El EDM quedó instalado del lado de la hoja corrediza automática, y la otra hoja, se abre hacia el exterior para facilitar el acceso de personal al equipo. Las dimensiones de la ventana debían ser tales, que la apertura destinada a la visión de la lente del distanciómetro no tuviera interferencias, aun cuando el EDM apuntara a los prismas en posiciones extremas del volcán. Debido a lo anterior se obtuvieron las posiciones de los prismas y se realizó el cálculo de las dimensiones de la ventana. Para evitar que los prismas queden ocultos, se determinaron las dimensiones mínimas de 43.7x12.5 cm, tomando en cuenta una apertura angular horizontal de 52.63°, una apertura vertical de 9.07°, una distancia entre el EDM y la ventana de 15 cm y un ancho del muro de 12 cm. Las dimensiones finales de la abertura quedaron en 50x30 cm.

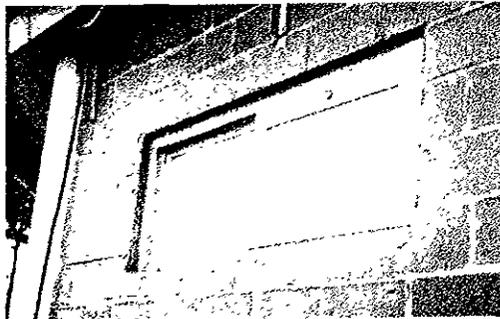


fig.3.2.4.1 Ventana cerrada exterior de la caseta

Para el movimiento se pensó inicialmente en utilizar las siguientes configuraciones: husillo-seguidor, engrane-cremallera, y poleas con bandas; sin embargo, la que resultó de menor costo y mayor facilidad para su implementación fue la de husillo (tornillo) y seguidor. En esta configuración la fuerza del motor se transmite a un husillo que al girar mueve un seguidor, transformando el movimiento de rotación en un movimiento de desplazamiento

lineal. Debido a que el seguidor está acoplado a la hoja corrediza de la ventana, ésta se desplaza entre sus posiciones abierta y cerrada.



fig.3.2.4.2 Ventana desde el interior

Tanto el husillo como el motor se acoplan al marco de la ventana, el husillo gira sobre dos rodamientos, de manera que éste y el motor quedan alineados sobre el mismo eje de giro.

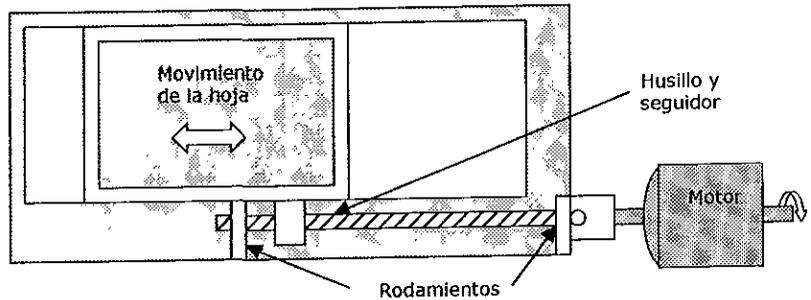


fig.3.2.4.4 Esquema de la ventana con el seguidor, husillo y motor

3.2.5 Diseño de la Estructura Superior y Soporte Base

Para la integración de los componentes mecánicos del sistema de movimiento se diseñó una estructura con el propósito de ensamblar las dos mesas rotatorias (tornillo sinfín- engrane corona) con sus respectivos motores, dos sensores de posición angular (encoders) y el distanciómetro (EDM). El sistema de movimiento debe ser capaz de girar al distanciómetro sobre dos ejes de rotación, teniendo éstos ejes un punto de intersección como se muestra a continuación:

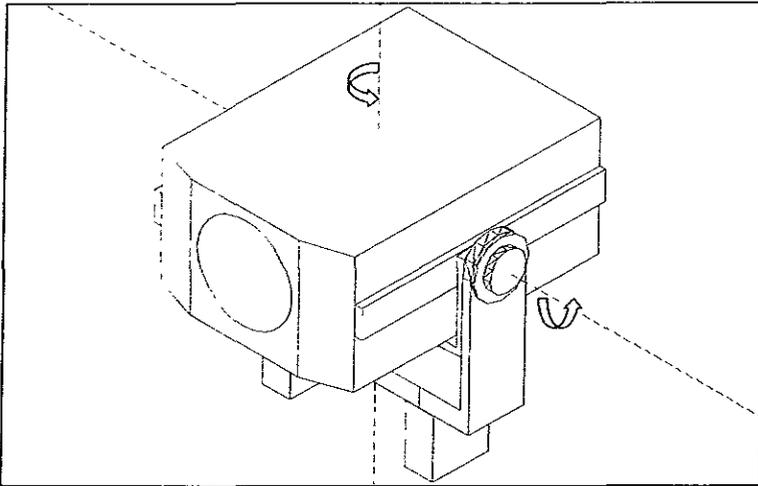


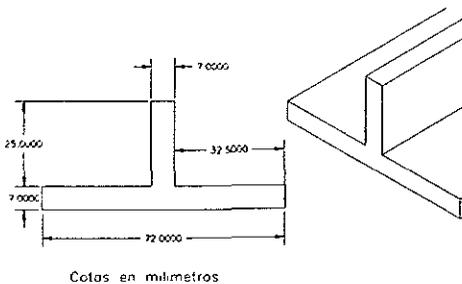
fig 3.2.5.1 Distanciómetro láser (E.D.M.) y ejes de rotación del sistema

Por las características geométricas se llegó a una configuración en donde una mesa de movimiento rotacional proporciona al E.D.M. movimiento sobre un plano horizontal y la otra mesa movimiento sobre un plano vertical, siempre manteniendo el punto de emisión láser en la misma posición para evitar desplazamientos del origen.

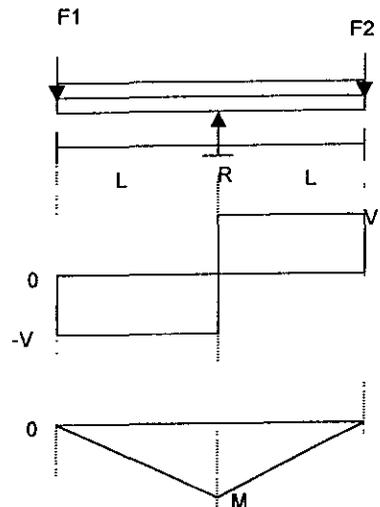
Debido a que se está utilizando un instrumento de precisión, las deformaciones debidas a cargas estáticas, dinámicas y térmicas deben ser mínimas, por lo que se toman en cuenta los siguientes factores:

- Configuración geométrica: la mesa rotatoria para movimiento vertical, queda colocada en un extremo de la estructura en forma de letra "U", sobre el otro extremo se coloca el sensor de posición angular "Encoder" además de un contrapeso para equilibrar las masas del motor y mesa rotatoria. Soportando a éste ensamble en la parte media de la estructura queda la otra mesa rotatoria para movimientos horizontales.

- Deformación por cargas estáticas: para el análisis se idealiza la parte principal de la estructura como una viga saliente, en donde las dos cargas principales sobresalen de los apoyos ubicados al centro de la viga; la sección transversal de la viga es en forma de T como se muestra en la figura, éstas dimensiones se seleccionan para minimizar el número de piezas de la estructura y facilitar su ensamble y desensamble durante el periodo de ajustes, teniendo la posibilidad de sujetarlas de canto por medio de tornillos; a continuación se presenta un análisis de la viga.



Teniendo las fuerzas: $F1 = F2 = 50 \text{ N}$
 La distancia: $L = 0.13 \text{ m}$
 Se calcula la reacción en el apoyo,
 $R = 100 \text{ N}$
 Se realiza el cálculo del esfuerzo máximo
 causado por flexión:
 Teniendo la gráfica de fuerza cortante
 en donde $V = 50 \text{ N}$
 Y de la gráfica de momento
 flexionante en donde $M = 6.5 \text{ N}\cdot\text{m}$
 que actúa a la mitad de la viga
 El eje centroidal se encuentra a 7.62 mm sobre la parte media de la base de la
 viga y su momento de inercia es: $I = 2.1844 \times 10^{-7} \text{ m}^4$
 El esfuerzo máximo inducido por flexión ocurre en la cara superior o inferior de
 la viga en el punto donde ocurre el momento flexionante máximo.



$$\sigma_{\max}^i = \frac{Mc}{I} = \frac{(6.5N \cdot m) \cdot (0.00762m)}{2.1844 \times 10^{-7} m^4} = 2.27 \times 10^5 \frac{N}{m} = 0.22674 MPa \text{ a la compresión y}$$

$$\sigma_{\max}^s = \frac{Mc}{I} = \frac{(6.5N \cdot m) \cdot (0.02438m)}{2.1844 \times 10^{-7} m^4} = 7.25 \times 10^5 \frac{N}{m} = 0.7255 MPa \text{ a la tensión}$$

El esfuerzo de diseño utilizado es: $\sigma_d = \frac{s_y}{2}$, sea: $\sigma_{\max} = 0.7255 MPa = \sigma_d$, resolviendo: $s_y = 2 \cdot \sigma_{\max} = 1.45 MPa$.

Con la geometría mencionada casi cualquier material cumple y excede la resistencia requerida, pero a continuación se analiza la rigidez para evitar la deflexión excesiva.

La referencia ⁹ sugiere que los límites para deflexión en una viga de máquina de alta precisión sean: $y_{\max} = 1 \times 10^{-6}$ a 1×10^{-5} mm/mm de longitud de viga. Como la sección transversal de la viga es uniforme a lo largo de ella, se puede

utilizar la ecuación¹⁰: $y = \frac{PL^3}{48EI}$, para determinar la deflexión máxima y si

proponemos como material, acero estructural ASTM A36 por su comportamiento, bajo precio y facilidad de adquisición, con una rigidez¹⁰ de $E = 200 Gpa = 200 \cdot 10^9 N/m^2$

Se tiene que: $y = \frac{(100) \cdot (0.26)^3}{48 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 2.1844 \cdot 10^{-7}} = 8.38 \cdot 10^{-7} m$, y finalmente, $y = 3.2 \times 10^{-6}$ [mm/mm de longitud de viga], quedando dentro del rango propuesto para vigas de máquina de alta precisión y cumpliendo los requerimientos de deformación por cargas estáticas.

- Deformación por cargas dinámicas: Ya que el sistema tiene movimientos muy cortos debido a su naturaleza de instrumento de precisión, las velocidades y aceleraciones son pequeñas, por lo que las fuerzas debido a aceleraciones se pueden despreciar.
- Deformación térmica: Cuando la estructura se somete a cambios de temperatura se producen deformaciones, éstas deformaciones pueden provocar que la referencia de medición del instrumento cambie de posición, resultando en medidas inconsistentes; debido a la forma geométrica de la estructura, casi todas las deformaciones térmicas se anulan por efectos de simetría, resultando solamente una componente de deformación que provoca que la referencia cambie su elevación respecto al piso, dicho cambio se estima a continuación.

Para la parte superior de la estructura que consiste en la forma "U" y la caja base (ver dibujo apéndice B) se tiene una longitud vertical de 302 mm desde la base de la caja hasta el punto de emisión del láser, considerando todos los metales como acero estructural con un coeficiente de expansión térmica $\alpha = 11.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ C^{-1}$ (11), considerando un cambio de temperatura de $25^\circ C$, resulta en un cambio de longitud:

$\delta = \alpha \Delta T = 11.7 \times 10^{-6} * 0.302 * 25 = 88.34 \times 10^{-6} m = 0.08834 mm$, que se tendrá que sumar a la deformación que sufre el soporte de anclamiento (trípode).

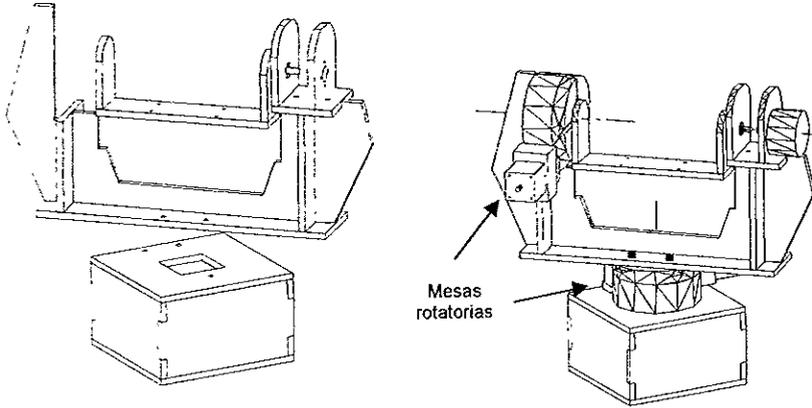


fig.3.2.5.2 Ensamble de la estructura superior sin y con partes para movimiento

A continuación se muestra un esquema de la configuración final de la estructura del sistema de movimiento:

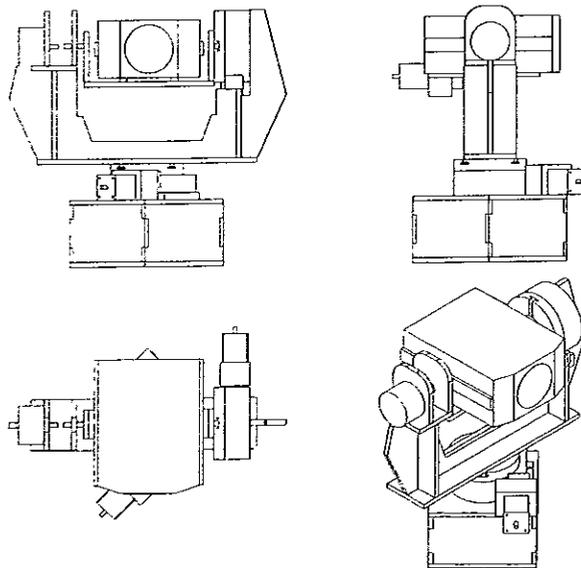


fig. 3.2.5.3 Esquema del ensamble completo de la estructura superior con distanciometro

Para fijar la estructura al piso se diseñó un soporte que debe cumplir con las mismas características de rigidez, por lo que se evaluaron varias configuraciones, llegando a una armadura consistente en tres tubos de sección cuadrada formando una pirámide trunca de base triangular, una especie de trípode (ver dibujo apéndice B); el análisis de deformación térmica da como resultado: $\delta = \alpha L \Delta T = 11.7 \times 10^{-6} * 15 * 25 = 438.8 \times 10^{-6} m = 0.4388 mm$, y al sumarle la deformación de la estructura superior resulta en una deformación total de, $\delta = 527.1 \times 10^{-3} mm \approx 0.5 mm$ que al ser un desplazamiento tan pequeño y vertical no altera las medidas del distanciometro. Por otro lado como la deformación por cargas estáticas permanece constante, ésta se puede despreciar.

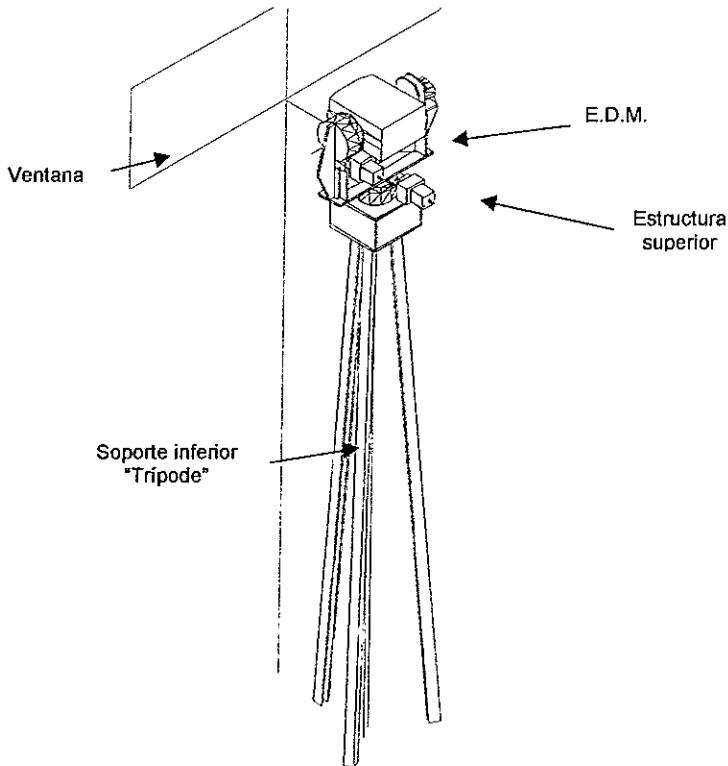


fig.3.2.5.4 Ensamble completo con soporte de anclaje al piso (Nótese el rectángulo en la parte superior que representa la posición de la ventana)

3.3 Sistema Electrónico

3.3.1 Sistema de Control de la Ventana Automática

Para el movimiento de la ventana se necesita un motor de giro reversible, para lo cual es posible usar un motor de corriente directa alimentado por una fuente de voltaje, o de otra forma, un motor de corriente alterna con control de sentido de giro y de velocidad. Resultó ser más económica la opción del motor de alterna, debido al mayor costo de una fuente de voltaje y del motor de CD; se adquirió un motor de taladro comercial que cumple con el torque necesario, cuenta con reductor de velocidad, es reversible y de velocidad variable a un costo razonable y con potencia de 400 W, el cual se adaptó para poder ser controlado remotamente.

Para cambiar el sentido de rotación, el motor utiliza un doble interruptor que fue substituido por relevadores electromecánicos y se fijó una velocidad adecuada para el movimiento.

Se utilizaron dos microinterruptores para hacer la función de sensores en las posiciones extremas de la ventana, con éstas dos señales y una de control transmitida remotamente, se obtienen las entradas de un circuito de compuertas lógicas tipo TTL, el cual proporciona dos salidas que activan una serie de interruptores que hacen girar el motor en ambos sentidos y lo detienen cuando la hoja de la ventana llega a las posiciones de abierto o cerrado.

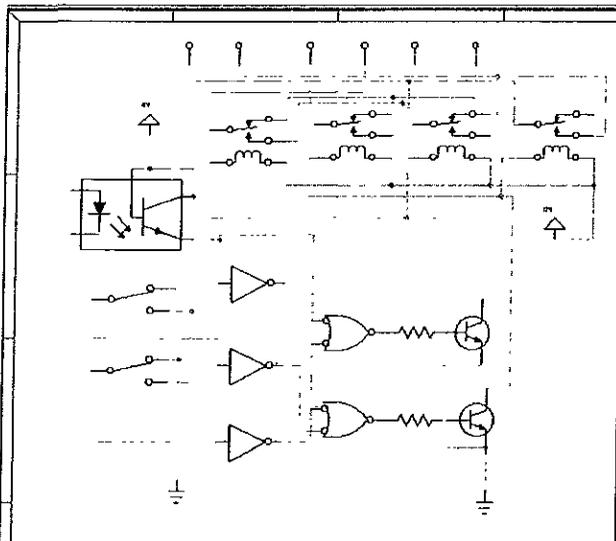


fig 3.3.1 Diagrama primer circuito control de la ventana automática

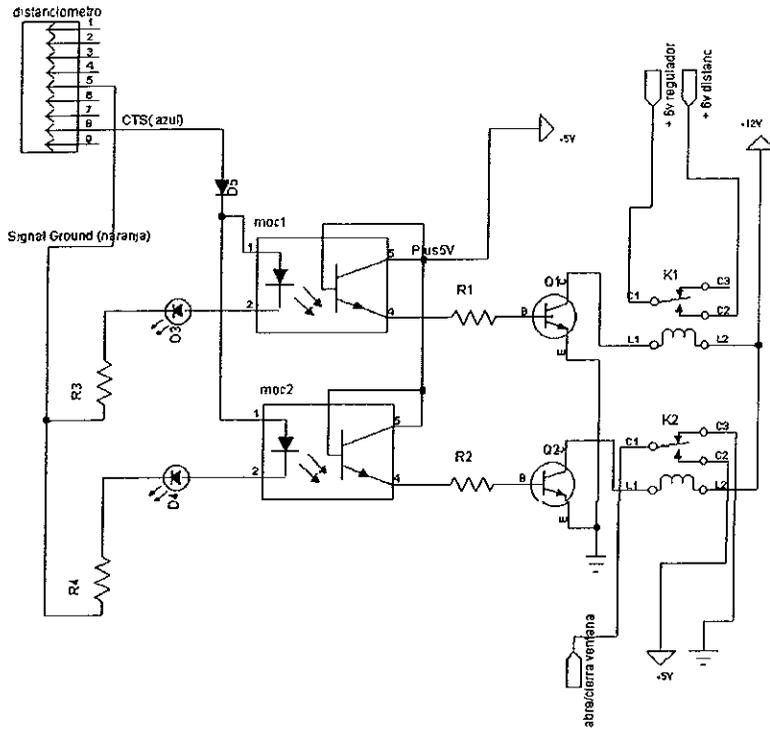


fig. 3.3.2 Diagrama circuito señal de encendido desde radiomódem

La configuración anterior da como resultado una apertura total de la ventana en aproximadamente 50 segundos.

El movimiento de la ventana obedece a la señal abrir - cerrar proporcionada por el programa de control, de tal forma que al encontrar la señal cerrar, sin importar en que posición se encuentre, el motor gira hasta cerrar completamente la venta; de manera similar, al recibir la señal de abrir, el motor gira en sentido contrario hasta abrirla totalmente. Cabe mencionar que si por alguna razón el sistema pierde energía durante algún periodo temporal, éste responderá adecuadamente a la señal partiendo del estado en el que quedo antes de la falta de energía, restableciendo sus movimientos totalmente.

Se pensó en agregar seis sensores más, dos en paralelo con los ya existentes en las posiciones de totalmente abierto y totalmente cerrado, con el fin de hacer mas seguro el sistema; dos más instalados en una posición intermedia para variar la velocidad con el fin de abrir con mayor rapidez la hoja de la ventana; por último otros dos foto sensores para detener el motor en caso de que alguna persona se encontrara en la ventana y evitar accidentes.

Por lo tanto quedarían como entradas ocho sensores en total más una señal de control y tres salidas, dos para los sentidos de giro y una para regular la velocidad

3.3.2 Regulador de Voltaje para Alimentar al Distanciómetro Electrónico.

El distanciómetro Red2L originalmente funciona con una batería que le proporciona una alimentación de 6 voltios (nominales), para mantener alimentado el EDM, fue necesario adaptar un regulador de voltaje. Se utilizó un circuito integrado que es un regulador ajustable de voltaje de tres terminales con 1% de tolerancia de salida capaz de proveer hasta 1.5 A suficiente para el requerimiento del distanciómetro de 0.9 A.

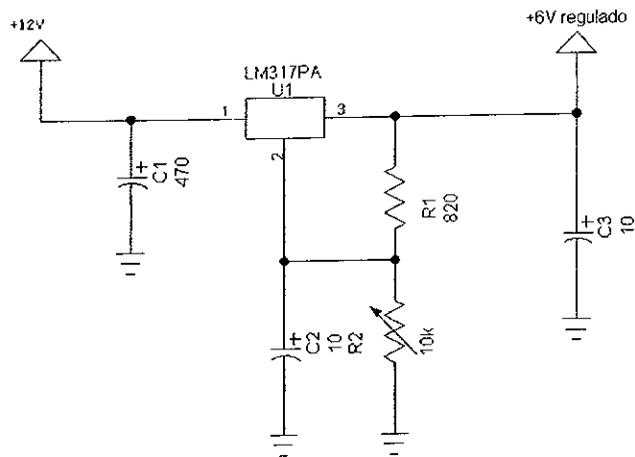


fig. 3.3.3 Diagrama del regulador de voltaje para el E.D.M.

3.3.3 Interfaces de Comunicación.

Las medidas obtenidas por el distanciómetro deben ser transmitidas por medios electrónicos para ser interpretadas. Para lograr esto, la mayoría de los distanciómetros electrónicos cuentan con un puerto de comunicación mediante el cual se pueden vaciar los datos obtenidos hacia alguna terminal.

En el caso específico de éste proyecto se usó un distanciómetro electrónico de la marca Sokkia modelo Red 2L el cual cuenta con un puerto serial que cumple con el estándar de comunicación RS-232C. El estándar de comunicación RS-232C es la interfase más antigua y conocida¹² utilizada para comunicaciones DTE/DCE es decir entre CPU y equipos periféricos de computadoras.

El estándar TIA/EIA-232-F (RS-232) completo especifica los requerimientos mecánicos (conector(es)), eléctricos (características del transmisor/receptor), y funcionales (definición de circuitos) para una interfase binaria serial DTE/DCE. Se especifica un conector tipo D de 25 terminales del que se usan sólo 22 terminales; la mayoría de las terminales no son necesarias para una comunicación de PC normal, y por eso, la mayoría de las nuevas PC's son equipadas con conectores macho tipo D de sólo 9 terminales. El umbral de voltajes bajo los que se trabaja es de +3VDC a +25VDC para un "0" lógico o prendido y de -3 a -25 VDC para un "1" lógico o apagado. A continuación se muestra una tabla que relaciona el número de terminal con su función.

Conector de 9 terminales (DB_9)	Conector de 25 terminales (DB_25)	Función EIA-232-F (RS-232)
Pin 1 DCD	Pin 8 DCD	Detector de señal de línea recibida
Pin 2 RD	Pin 3 RD	Recepción de datos
Pin 3 TD	Pin 2 TD	Transmisión de datos
Pin 4 DTR	Pin 20 DTR	Terminal lista (DTE)
Pin 5 GND	Pin 7 GND	Tierra
Pin 6 DSR	Pin 6 DSR	Equipo listo (DCE)
Pin 7 RTS	Pin 4 RTS	Pedimento para mandar datos
Pin 8 CTS	Pin 5 CTS	Listo para mandar datos
Pin 9 RI	Pin 22 RI	Indicador de llamada.

Tabla 3.3.3.1 Relación de terminales para el protocolo de comunicación EIA-232-F (RS-232)

Como el conector hiroshi del distanciómetro Sokkia RED 2L no es totalmente compatible con el conector tipo DB-9 se adaptó un conector, y finalmente se llevo a la siguiente configuración:

Conector Hiroshi del Sokkia RED2L	Conector de 9 terminales (DB-9)	Función
Pin 1	Pin 5	Tierra
Pin 3	Pin 3	Envío de datos
Pin 4	Pin 7 RTS	Empieza o termina el envío de datos.
Pin 2		Formato (metros/ pies)
Pin 5		Indica que el distanciómetro está listo.

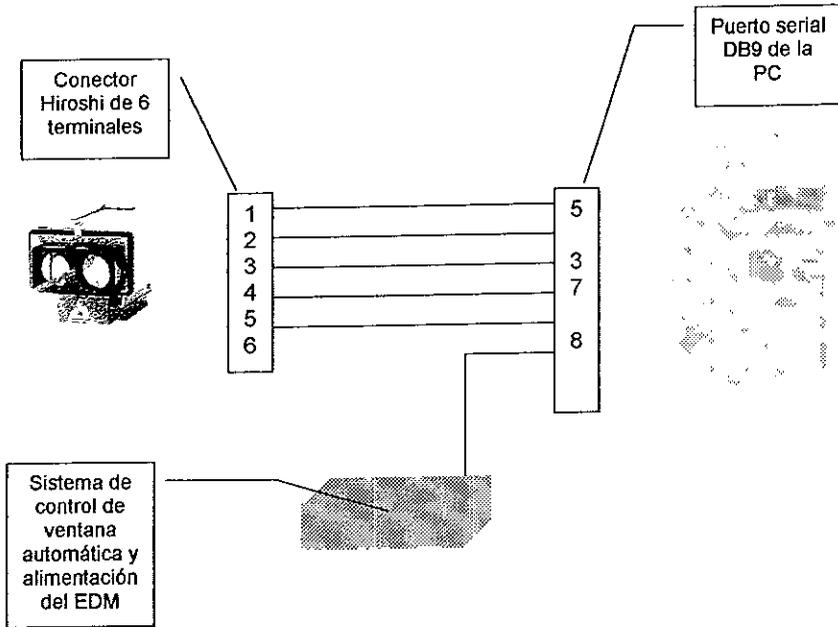
Tabla 3.3.3.2 Relación de terminales entre el distanciómetro y el puerto serial

El EDM empieza a medir toda vez que su terminal 4 cambie de estado (se conecte a tierra); los datos son transmitidos por la terminal 3 y el formato de metros a pies es seleccionado al aterrizar la terminal 2.

El programa de captura de datos se encarga de mandar la señal para activar el distanciómetro y éste a su vez manda los datos obtenidos en la última

medición. Las especificaciones de comunicación del Sokkia RED2L se muestran en el apéndice D.

La conexión entre la PC y el EDM se muestra en el siguiente esquema:



3.4 Telecomunicaciones

Desde que una estación remota es parte del sistema, la comunicación entre las partes se torna importante. El intercambio de información se lleva a cabo entre la computadora remota y la local por medio de una comunicación serial utilizando el estándar TIA/EIA-232-F (RS-232). Debido a que no se tiene comunicación por cable, se optó por establecer una comunicación inalámbrica; encontrándose conveniente el uso de señales de radio por su relativamente fácil implementación y bajo costo.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre sistemas inalámbricos:

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Microondas	Ondas electromagnéticas de radio de 1mm a 30 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de hasta 2 Mbps • Cubre requerimientos de distancia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere línea de vista. • Transmisión afectada por condiciones ambientales. • Alto costo (arriba de US \$30,000)¹³
Espectro disperso	La señal de radio se dispersa en una frecuencia amplia.	<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad al ruido. • Señal segura y libre de errores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere línea de vista.
Satélite	Enlace igual al de microondas pero con un punto localizado en el espacio.	<ul style="list-style-type: none"> • Alcance en cualquier terreno. • Gran ancho de banda directo al usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> • La señal presenta gran retardo (270ms). • Poca seguridad • Falta de disponibilidad.
Infrarrojo		<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad al ruido. • No requiere licencia por uso de frecuencia. • Velocidades de hasta 2 Mbps. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere línea de vista • Alcance máximo de 25 metros.

Tabla 3.4.1 Comparación entre los distintos sistemas de telecomunicaciones

Se adquirieron dos radiomodems con las siguientes características (ver apéndice D):

- Transmisión segura y libre de errores gracias a su sistema de comunicación Espectro disperso con saltos de frecuencia FHSS (siglas en inglés de Frequency-Hopping Spread Spectrum).

- Tolerancia a interferencias de radio y electromagnéticas, motores funcionando, además de temperaturas extremas (-40 a +75°C).
- Uso de la banda libre de 902 a 928 MHz.
- Velocidad de comunicación de hasta 115 kbps.
- Cuentan con una chasis de acero para proteger componentes internos.

Además debido a que la distancia a cubrir excedía el rango posible de las antenas tipo whip (incluidas en los radios) fue necesario adquirir dos antenas direccionales tipo yagi.

Los radiomódems fueron conectados a los puertos seriales de las computadoras. El mejor funcionamiento se dio bajo los siguientes parámetros:

Tasa de transmisión:	115 200 (half duplex)
Bits de datos	8
Paridad	Ninguna
Bits de parada	1
Chequeo de paro	Ninguno/Apagado
Detección de transmisión	Ninguna/Apagado
Potencia	1 Watt

Tabla 3.4.2 Parámetros de comunicación

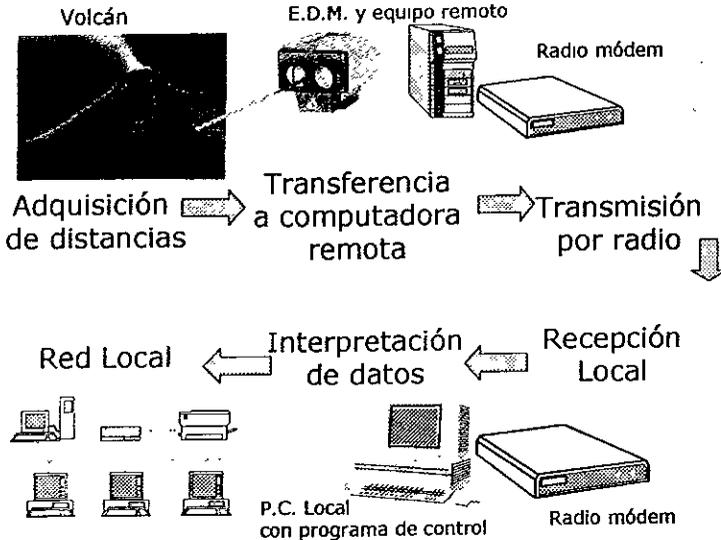
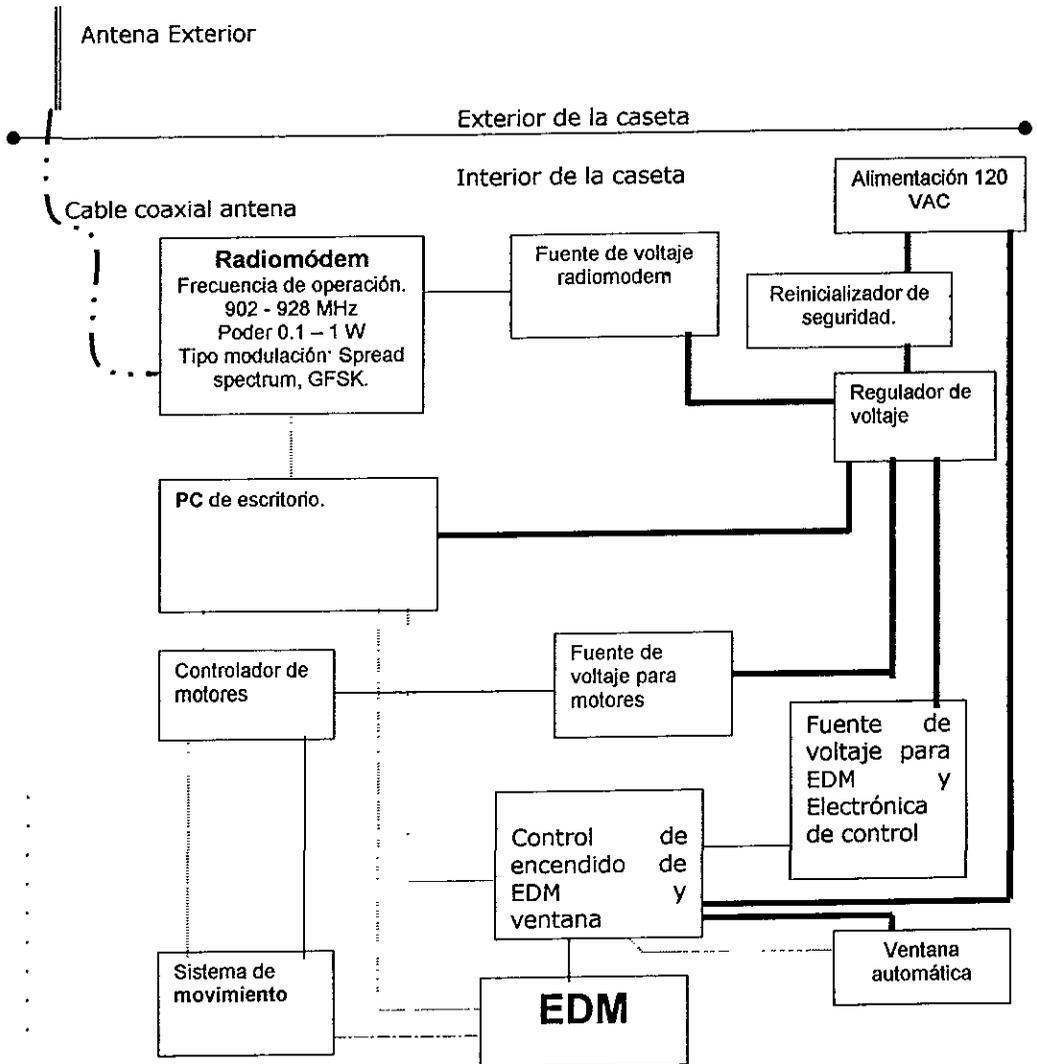


Fig. 3.4.1 Esquema de transmisión de datos



Descripción de líneas

<i>Cable que transmite corriente alterna</i>	=====
<i>Cable que transmite corriente directa</i>	-----
<i>Cable que trasmite datos</i>
<i>Cable coaxial de la antena</i>
<i>Antena</i>	=====
<i>Acoplamiento mecánico</i>

fig 3.4.2 Diagrama de conexiones

La forma en que los motores de pasos cambian de dirección obedece a la siguiente definición¹⁵:

$$n \equiv 1(\text{mod } 2)$$

$$n \equiv 0(\text{mod } 2)$$

$$\forall n \in \mathbb{Z}$$

donde n representa el segmento sobre el cual se desplaza el distanciómetro. Es decir, dado que el sistema se mueve en dos ejes (\mathbf{Y} y \mathbf{Z}) la forma en que se determina el cambio de dirección y de movimiento en cada motor depende exclusivamente de su congruencia con módulo 2, haciendo que estos giren en sentido positivo o negativo de acuerdo con la regla de la mano derecha¹⁶.

Si cada uno de los segmentos que componen a la espiral lo dividimos en fragmentos (f_h para los horizontales y f_v para los verticales) de 0.68 m (desplazamiento tangencial mínimo del sistema) y se numeran desde uno hasta n puede verse que el número de segmentos horizontales (n_h) siguiente es mayor respecto al anterior. Lo mismo sucede para los segmentos verticales (n_v).

Lo anterior se puede expresar de la manera siguiente:

Longitud total de n_h

$$n_h = \sum_{i=1}^n f_{h,i}$$

Longitud total de n_v

$$n_v = \sum_{i=1}^n f_{v,i}$$

dando como resultado parejas de segmentos de igual magnitud. Por ejemplo, en su primer desplazamiento tanto horizontal como verticalmente, el soporte sólo se mueve un paso de manera horizontal y otro en forma vertical, congruentes con un módulo dos. La dirección es positiva para el giro en \mathbf{Y} y negativa para el eje \mathbf{Z} . En el siguiente recorrido el número de pasos es dos (congruente con cero módulo dos) siendo el sentido de giro en ambos ejes exactamente contrario respecto al primer desplazamiento, de tal forma que esto podría repetirse indefinidamente. Con base en este razonamiento se puede decir que:

$$\text{Si } n_h \equiv 1(\text{mod } 2) \Rightarrow \vec{\Omega}_{sist} = -\Omega_z \hat{k}$$

$$\text{Si } n_v \equiv 1(\text{mod } 2) \Rightarrow \vec{\omega}_{rel} = \omega_z \hat{j}$$

$$\text{Si } n_h \equiv 0(\text{mod } 2) \Rightarrow \vec{\Omega}_{sist} = \Omega_z \hat{k}$$

$$\text{Si } n_v \equiv 0(\text{mod } 2) \Rightarrow \vec{\omega}_{rel} = -\omega_z \hat{j}$$

de acuerdo con el sistema de referencia propuesto en el capítulo 3.

Es así como el sistema mueve los motores de manera sincronizada, primero el motor 1 o cuyo giro es respecto al eje **Z** y después el motor 2. Si el motor 1 gira en sentido positivo el motor 2 lo hace en sentido contrario y viceversa.

3.5.2 Forma de Operación

El primer paso para es indicar las posiciones de cada uno de los reflectores, convirtiendo los ángulos de ambos ejes en números de pasos, tomando en cuenta que la precisión en ambos ejes es de 0.0125° por paso. Por ejemplo, si el ángulo de inclinación es de $15^\circ 40' 00''$, el número de pasos correspondiente es de 1254 en números cerrados. De esta manera, para definir la posición del distanciómetro, se maneja un sistema de coordenadas correspondiente al número de pasos requerido en cada motor:

$$\text{posición} = (N_z, N_y)$$

donde N_z , representa el número de pasos que gira el motor respecto al eje **Z** y N_y respecto a **Y**.

Una vez que se tienen los datos de la posición de cada reflector la medición se lleva a cabo de la manera siguiente:

- El sistema parte de una referencia absoluta, es decir $\text{posición} = (0,0)$.
- Desplazamiento sucesivo a cada uno de los reflectores partiendo desde aquél que se encuentre más alejado respecto a la referencia absoluta, el cual se designará desde el principio.
- En cada punto se medirá la distancia entre el reflector y la estación de monitoreo Tlamacas.
- En caso de que el reflector no sea localizado, el sistema iniciará el modo de búsqueda en forma de espiral hasta que el distanciómetro pueda tomar lectura. Si esto no es posible dentro de un radio de 4.8 m entonces la última posición conocida del reflector en cuestión será guardada por el sistema y se dirigirá a esa posición cuando se inicie un nuevo ciclo de lecturas. Esto se debe a que pueden ser varias las razones por las que reflector no pueda ser encontrado, tales como la obstrucción del láser provocada por la niebla, la destrucción del reflector provocada por las rocas que salen del cráter durante alguna exhalación y puedan destruirlo por medio de un impacto o por efectos de refracción derivados de perturbaciones atmosféricas.
- La posición de cada uno de los prismas es actualizada una vez que el proceso de medición finalice, sin importar que dicha posición pueda repetirse en algunos casos.
- Finalmente el soporte móvil regresa al origen, listo para el siguiente ciclo.

3.5.3 Descripción y Funcionamiento de los Programas de Control y Adquisición de Datos.

Los programas que constituyen el control por estados del sistema, están hechos en dos lenguajes diferentes: Visual Basic 5.0 (VB) y Borland C 3.1. (BC). El uso del primero se debe principalmente a la necesidad de una interfase visual capaz de mostrar los resultados obtenidos por la medición de la distancia, así como también un sencillo manejo del sistema.

Como se describió en la sección 3.4 de este capítulo la comunicación entre la estación de monitoreo Tlamacas y el CENAPRED se hace por medio de radiomódems, por lo que la recepción de los datos se realiza a través del puerto serial.

La ventana del programa ejecutable para windows que constituye el sistema de control (comunicación) se muestra a continuación:

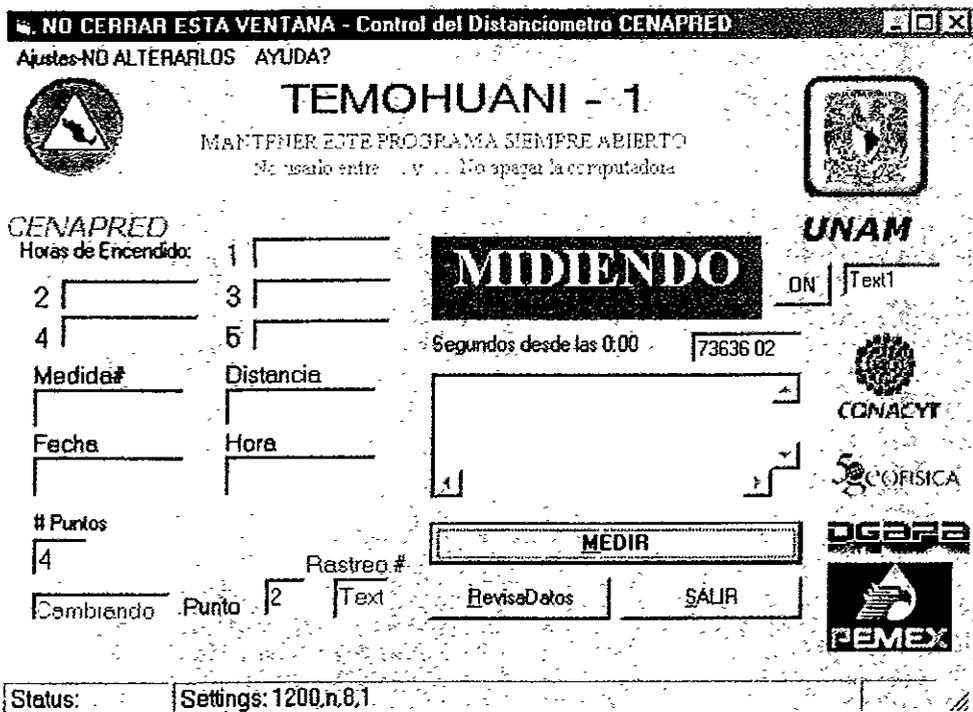


fig. 3.5.4 ventana del programa ejecutable en Visual Basic

- Los recuadros de la parte superior, numerados del 1 al 5 y que a la izquierda tienen el mensaje "Horas de Encendido", representan cinco horarios diferentes

durante los cuales el sistema es accionado automáticamente. El tiempo se cuenta en segundos a partir de las 0:00 h.

- El botón "MEDIR" activa el sistema al momento en que éste es presionado casi a cualquier hora, excepto en aquella durante la cual el sistema se apaga para "resetear" el radiomódem. Cuando esto se hace aparece el letrero que dice "MIDIENDO" (también sucede si se activa de manera automática por medio de los temporizadores).
- Del lado derecho de este letrero aparecen un botón y una ventana pequeña, en el primero de ellos, se indica el momento en el cual el distanciómetro es encendido o apagado. En la ventana aparecen en primera instancia los datos obtenidos por el distanciómetro y el mensaje "Ajustando". Este último sólo aparece cuando la señal que el distanciómetro recibe después de tratar de medir es nula, es decir, que no se generan datos a causa de una posición inadecuada del distanciómetro para poder medir. Dicha posición se da cuando el láser apunta de manera muy cercana al reflector por lo que al ajustar, el sistema verifica si ésta es o no viable para poder efectuar la medición. De no ser así el sistema continua el rastreo hasta que el distanciómetro sea ubicado correctamente.
- En el recuadro que se encuentra en la parte inferior del letrero anterior, aparecen las mediciones obtenidas por el distanciómetro en el momento de la medición.
- Los recuadros de la izquierda señalan (de arriba abajo) el número de medición realizada, la fecha y hora en que se hizo, la distancia y el punto al cual se está midiendo, el total de rastreos realizados y el número total de reflectores. Debajo de este último indicador, aparece un letrero que emite dos mensajes: "Cambiando" durante el tiempo que le toma al sistema trasladarse de un punto a otro, y "Listo" desde el momento en que está en posición hasta el final de la medición en alguno de los puntos.
- Con el botón "RevisaDatos" se tiene acceso a la base que contiene todas las mediciones realizadas desde una fecha específica.
- "Salir" se emplea para detener el programa. Cuando esta tecla es presionada aparecerán dos mensajes de advertencia, indicándole al usuario si está seguro de querer suspender la ejecución del proceso.
- En la esquina superior izquierda aparece "Ajustes-NO ALTERARLOS", esta tecla contiene parámetros que pueden ser corregidos en caso de ser necesario, tales como el número de lecturas a tomar, el tiempo que permanecerá encendido el EDM, etc.

Para que el soporte móvil desplace el emisor del EDM entre los puntos de medición y lleve a cabo el movimiento en forma de espiral para la búsqueda del reflector cuando éste no se encuentre en la última posición conocida, se emplearon las librerías de movimiento "Instep" de Microkinetics Corp. escritas en la versión 3.1 de Borland C.

Las ventajas que representa la realización del software de control de movimiento con estas librerías son entre otras, que dentro de estas librerías se encuentran funciones tan básicas como el movimiento de motores de pasos y otras de mayor complejidad como la compensación de desplazamiento angular por efectos de "backlash" ¹⁷.

El uso de una herramienta como ésta permite que el tiempo de desarrollo del sistema disminuya y a su vez se obtenga un diseño menos propenso a defectos por parte del programador como lo son un mal uso de la memoria, un inadecuado manejo de los datos, etc.

El funcionamiento de los programas es de la siguiente forma: antes de que los motores del soporte móvil den un paso, ya sea en dirección horizontal o vertical, el sistema verifica la señal enviada por el EDM, si ésta es cero (igual a "E00") o si se trata de alguna distancia. El tiempo que le toma a este dispositivo hacer cada muestreo es de 1.5 s. cuando recibe un "E00" y de 6 s. si se trata de la lectura de una distancia (tiempo que le toma al EDM realizar una medición en condiciones climáticas favorables).

La forma en que ambos programas se comunican permite que funcionen simultánea e independientemente (además de que se mantienen activos permanentemente). Esto significa que es posible iniciar indistintamente cualquiera de ellos sin que alguno pueda verse afectado por falta de información. Es importante mencionar, que ambos programas solamente pueden funcionar con un adecuado manejo de la información ya que de otra manera ocurren errores en el tiempo de ejecución. Para evitar este tipo de contratiempos es indispensable asignar ciertos atributos ya que de no ser así, puede darse el caso de que uno de los programas se sature o detenga frenando el proceso hasta que el sistema sea restaurado.

Para poder compartir la información entre ambos programas, es necesario señalar diferentes parámetros que permitan llevar a efecto esta tarea¹⁸.

- Al ejecutar el programa de VB usando el botón "MEDIR", el radiomódem envía la señal para que la ventana de la estación de monitoreo se abra y de esta manera, el láser del EDM no esté obstruido para llevar a cabo la primera medición.
- En ese momento, el programa de VB manda un dato al programa de BC y de esta manera, el soporte inicia su desplazamiento angular hacia la primera posición, una vez que se encuentra ahí, entra en un "loop" que se modifica cada vez que el EDM recibe una nueva señal (ya sea un E00 o una medición).
- Si el EDM envía una señal nula, entonces el soporte lo desplaza en forma de espiral, desde el lugar donde se supone está el reflector hacia afuera. El programa en BC verifica que el "E00" que está recibiendo sea nuevo o el último, para ello ambos programas cuentan el número de estas señales y de esa forma se actualizan permanentemente. Cada vez que el distanciómetro envía la señal "E00", se incrementa en una unidad el valor de la variable "intCuenta". Éste valor es enviado al programa de BC y su contenido es comparado con otra variable entera (cuenta1), si ésta es menor a la anterior, entonces el programa ejecuta una rutina en la cual el soporte móvil desplaza angularmente 0.0125° sobre el eje

Z o **Y** según sea el caso. Después la variable cuenta1 se incrementa en una unidad (dejando con los mismos valores ambas variables) de manera que el sistema se mantiene en espera de una nueva lectura.

- Si hay cambios en la posición del prisma al sistema se actualiza con la nueva ubicación, de no ser así se mantiene la última posición conocida y se guardan en el archivo "lugares.txt". Una vez que termina el ciclo de lecturas, el EDM se desplaza al origen y los programas se mantienen activos en todo momento para iniciar nuevamente el proceso.

Capítulo 4: Implementación del Sistema

4.1 Ensamble del Equipo

El sistema de movimiento desde el punto de vista mecánico se forma por un ensamble llamado "estructura superior" y un soporte base "tripié".

Ensamble de la estructura superior: se forma por piezas metálicas que en su mayor parte se elaboraron de placa de acero estructural de $\frac{1}{4}$ de pulgada de espesor, se cortaron utilizando pantógrafo (corte por acetileno) para posteriormente ajustarles las dimensiones mediante un rectificado; se eligió el corte por pantógrafo por ser económico y rápido a pesar de la moderada precisión (± 3 mm). El ensamble se llevó a cabo con tornillos allen para mayor resistencia y barrenos de $\frac{1}{8}$ maquinados con machuelos de cuerda estándar debido a que el sistema es un prototipo y éste tipo de unión permite modificaciones.

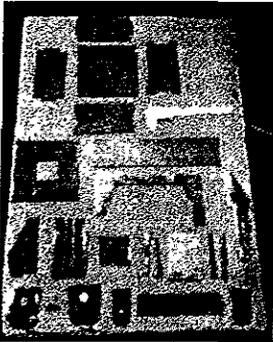


fig. 4.1.1. Piezas del soporte antes del rectificado



fig. 4.1.2. Rectificado y maquinado de las piezas del soporte.

Ensamble del soporte base: se forma por tubos de acero de sección cuadrada de $1\frac{1}{4}$ " ancho, unidos por tornillos inoxidables de cabeza hexagonal, tuercas y rondanas de presión, el maquinado consistió únicamente de cortes con segueta y taladrado de banco.



fig. 4.1.3 Ensamble del soporte con motores

Finalmente las piezas se recubrieron con uretano flexible para evitar corrosión durante su vida útil. El tiempo total de maquinado fue de aproximadamente 3 meses.



fig. 4.1.3 Ensamble del soporte con el trípode recubierto con uretano

4.2 Instalación en la Estación de Monitoreo

Para la instalación del equipo se tomaron en consideración los siguientes requisitos:

- **Ubicación geográfica:** El lugar de la estación de monitoreo debe tener libre vista a los prismas además de encontrarse a una distancia que no sobrepase la capacidad (ver apéndice D) del EDM.
- **Condiciones ambientales:** El EDM y el resto del equipo no están diseñados para trabajar en condiciones de intemperie.
- **Requerimientos energéticos:** se requiere de un suministro ininterrumpido de energía eléctrica para el correcto funcionamiento del equipo.
- **Comunicación:** La antena debe ser ubicada en un lugar libre de obstáculos para tener línea de vista con su contraparte que se instaló en la torre del CENAPRED en CU.
- **Accesibilidad:** La configuración debe ser tal que se agilice su instalación, prueba y mantenimiento periódico.
- **Seguridad:** Protección del sistema hasta donde sea posible contra factores naturales como son deslaves, rocas arrojadas por el volcán, polvo y cenizas; además de factores humanos como vandalismo, robo y accidentes.

Ubicación.

El personal que lleva a cabo las mediciones manuales de distancias toma como referencia un lugar ubicado sobre la base de una de las torres de telecomunicaciones en el cerro Tlamacas (Altitud de 4000 msnm; latitud 19.0663 N; longitud 98.6278 W), desde donde se tiene buena visibilidad de los prismas además de contar con fácil acceso; dentro de ésta instalación de telecomunicaciones se cuenta también con algunas casetas donde se tienen equipo y servicios básicos como electricidad, teléfono y agua. Se decidió ubicar el EDM en una de esas casetas previa autorización de PEMEX que es el propietario y a quien se agradece su cooperación; se realizó una inspección de las dimensiones y orientación de los cuartos de la caseta para seleccionar el mejor lugar, el que se muestra a continuación:

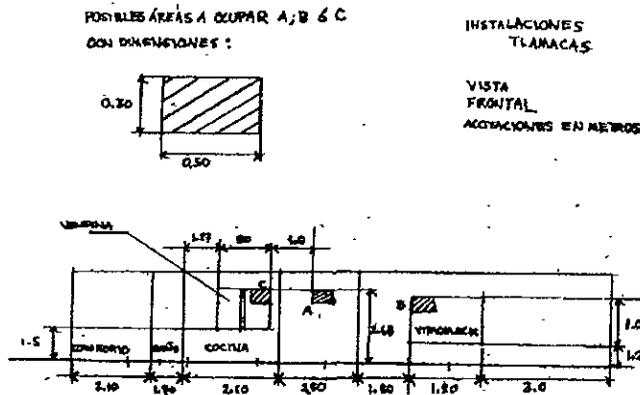


fig. 4.2.1 Esquema de distribución de la caseta de PEMEX en Tlamacas

Instalación de la antena

La antena de radio remota se instaló en la torre de comunicaciones de PEMEX a una altura aproximada de 6 metros sobre el nivel del piso de la caseta y con dirección hacia la otra antena ubicada en el CENAPRED como se muestra a continuación:

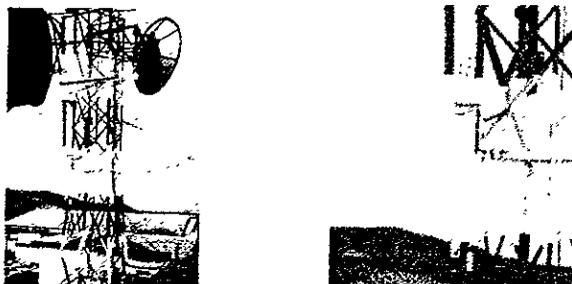


fig.4.2.2 Antena sobre torre de comunicaciones en la estación remota Tlamacas

Después de probar la comunicación se tendió el cable coaxial hacia donde quedaría finalmente el radiomódem.

Instalación de la Ventana

Debido a que el láser del EDM no debe atravesar ningún material a pesar de ser transparentes (ya que las lecturas se verían alteradas) se decidió instalar una ventana automática que dejara libre la lente del EDM, pero que a la vez, proteja al equipo de la intemperie; dicha ventana automática se instaló en un muro de la caseta desde donde se tiene visibilidad hacia el volcán.

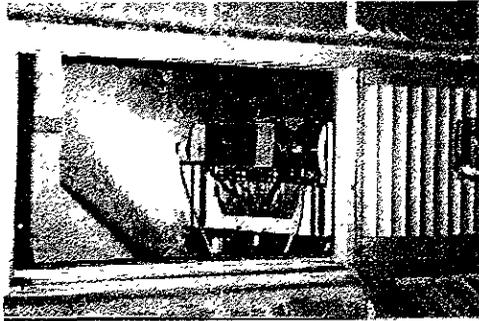


fig 4.2.3 Ventana abierta mostrando al distanciómetro

Energía

La caseta cuenta con energía eléctrica de 127 VAC 60 Hz. y además con una planta generadora Diesel, la cual proporciona aproximadamente 10 días de energía en caso de una falla en el suministro de la línea; ésta planta entra en operación 15 segundos después de la interrupción.

Anaqueel

Para fijar el equipo fue necesario diseñar un soporte lo suficientemente estable para impedir desplazamientos, se pensó en armar un anaquel con piezas comerciales que permitieran una fácil transportación y ensamble, además una adecuada resistencia a la carga. Para ello se usaron 9 postes calibre 14 de 2.20m de largo y 4 entrepaños calibre 20 de 0.85x0.60m además tornillos de 5/16x1/2"; también se tomó en cuenta la viabilidad del mantenimiento desde el exterior, ya que para acceder al equipo desde el interior de la caseta es necesaria la presencia de personal de PEMEX. Debido a lo anterior se llegó a la siguiente configuración:

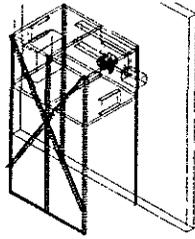


fig. 4.2.4 Esquema del anaquel donde se aloja el equipo.

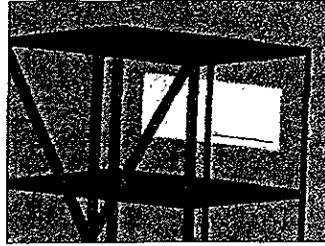


fig. 4.2.5 Vista del anaquel sin paredes y ventana abierta desde el interior de la caseta

Se diseñó un compartimento donde se instaló el EDM con su sistema de movimiento, el control de la ventana automática, el radiomodem y una computadora. Para tener acceso desde el exterior al equipo se cuenta con una puerta y por razones de seguridad las paredes del anaquel están cerradas, logrando así un espacio aislado del resto de la caseta.

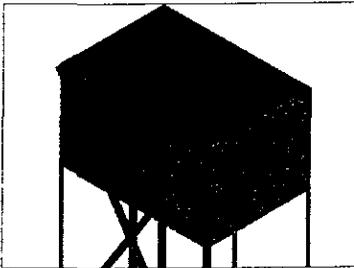


fig.4.2.6 Anaquel con las tapas laterales.

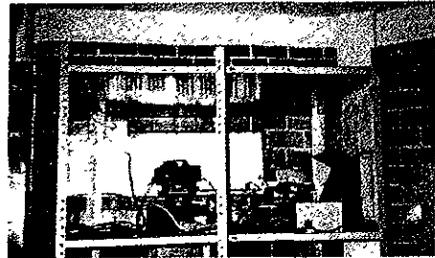


fig. 4.2.7. Anaquel abierto desde el interior de la estación

A continuación se muestra la ubicación de los componentes del sistema dentro del anaquel:



fig. 4.2.8 Distribución del equipo dentro del anaquel

Instalación de tierra

Para proteger los radiomódems contra descargas eléctricas en la línea de transmisión de datos, se instalaron dos supresores de impulsos IS-50NX-C1 marca Polyphaser colocados en el cable coaxial entre cada antena y radiomódem. Se conectaron a tierra mediante un cable calibre 8 AWG, la tierra se tomó de una terminal del sistema de tierras de la caseta; y en el CENAPRED, de la tierra instalada para los otros equipos de monitoreo. La alimentación eléctrica con que se cuenta en la caseta está debidamente polarizada y aterrizada, por lo que no fue necesaria una adaptación.

Capítulo 5: Resultados

5.1 Características Finales del Equipo

Dentro de los tres aspectos contemplados en el diseño (capítulo 3) a continuación se describen las características propias del sistema en su conjunto.

- La capacidad de respuesta del sistema está en función del tiempo que le toma al EDM poder realizar una lectura por lo que si el reflector no ha sufrido algún desplazamiento sobre su última posición conocida y la señal del distanciómetro puede llegar hasta el reflector sin ser afectada por algún tipo de perturbación atmosférica, el sistema puede realizar un total de 20 mediciones en un tiempo total de 2 minutos, debido a que el tiempo que le toma llevar a cabo una medición es de 6 s.
- En caso de tener que llevar a cabo una búsqueda sobre alguno de los puntos, el tiempo total de rastreo sobre una superficie de aproximadamente 36 m² es de 210 s.
- La velocidad angular con la que se desplaza el sistema entre puntos es de aproximadamente 0.109 rad/s.
- El sistema es capaz de posicionarse respecto al reflector, en el lugar donde es posible tomar lecturas en buenas condiciones. Esto se lleva a cabo cuando el distanciómetro indica que la señal es muy débil y por consiguiente no es posible tomar una lectura adecuada, esto sucede cuando el haz del emisor se encuentra en una región muy cercana a la orilla del reflector, pero no en el lugar óptimo para hacer la medición. Entonces el sistema selecciona continuar el rastreo hasta llegar al lugar donde sea factible tomar lecturas en buenas condiciones.
- Mecánicamente el sistema está diseñado a prueba de deformaciones por cargas estáticas y por efectos de cambio en la temperatura.
- Con la comunicación directa entre la estación Tlamacas y el CENAPRED es posible reiniciar el sistema siempre que sea necesario sin peligro de perder información valiosa como lo son las posiciones de los prismas y los datos obtenidos. Además, que se tiene control del sistema desde la Ciudad de México. Por medio de un emulador puede "verse" la computadora que se encuentra en Tlamacas a través de la que se encuentra en el CENAPRED.

A continuación se muestran fotografías de la instalación final en la estación de monitoreo de Tlamacas.

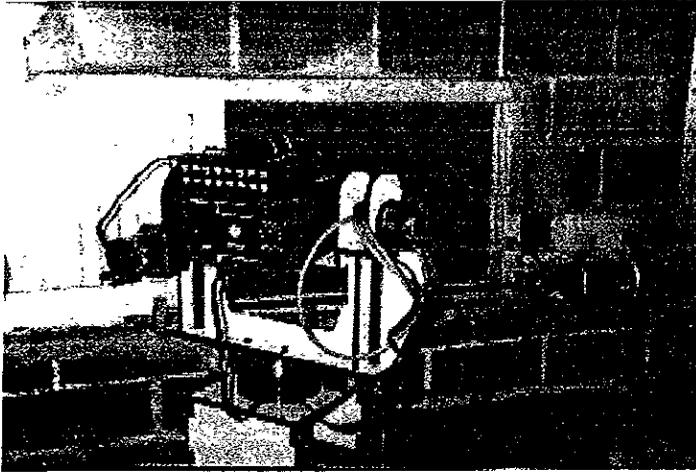


fig. 5.1.1 vista posterior del sistema desde el interior de la estación.

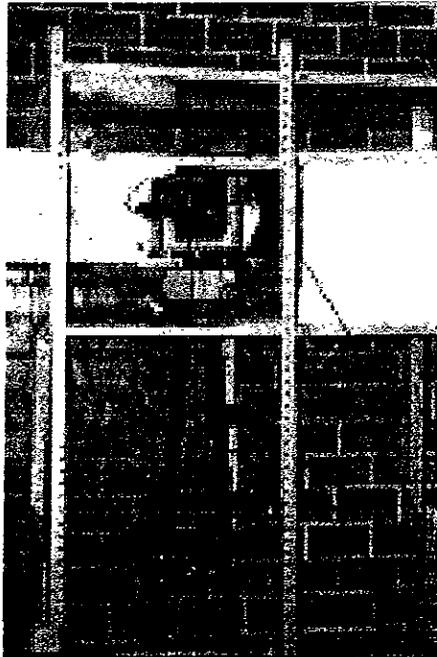


fig. 5.1.2 Sistema de movimiento sobre el trípode de acero, anaquel y CPU - Tlamacas desde el interior de la estación repetidora.



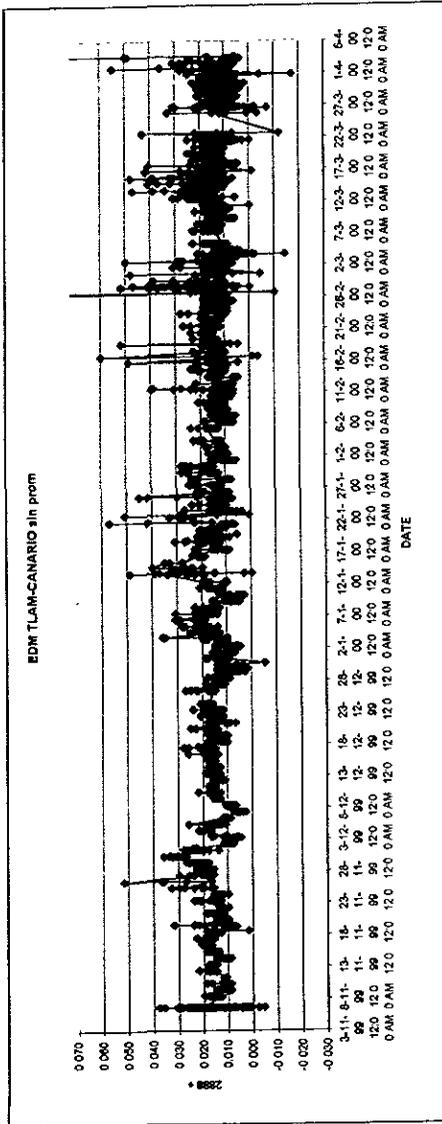
fig. 5.1.3 prueba del sistema usando ambas computadoras.

5.2 Mediciones desde la Estación de Monitoreo

Las gráficas que se muestran a continuación son el resultado del sistema que ha estado trabajando de manera preliminar desde el mes de noviembre de 1999 apuntando a un solo reflector.

La primer gráfica corresponde a todas las lecturas tomadas desde ese mes hasta abril del 2000. En ella se puede apreciar como ha sido la variación de la distancia entre ese punto y la estación de Tlamacas.

La segunda está asociada a diferentes eventos tales como exhalaciones, movimientos tectónicos y sismos. Estas actividades coinciden con alguna variación de magnitud mayor respecto a los días en los que no las hay, lo cual indica que el sistema, aunado a los demás equipos de monitoreo tales como los sismómetros, se correlaciona con el comportamiento mostrado por el volcán en esos días. También hay relación con los días en los que no se señala algún suceso importante ya que al igual que los demás sistemas, no registraron algo que pudiese considerarse de cuidado.



Las mediciones de la gráfica se encuentran en mm. vs tiempo.
 La distancia a partir de la cual hay fluctuaciones en las mediciones es a partir de los 2 888 000 mm. por lo que en el eje de las abscisas se hace la indicación de 2888*.
 La fecha a partir de la cual se iniciaron las mediciones con el sistema que apunta hacia un solo prisma es el 3 de noviembre de 1999.
 Los datos representados en la gráfica corresponden al total obtenido en la fecha indicada.

5.2.1 Ubicación de los Puntos de Medición

Una vez que se culminó la instalación del equipo y que las condiciones climáticas fueron aceptables se llevó a cabo por primera vez la búsqueda de los reflectores de la siguiente manera:

- Empleando el telescopio que viene incluido en el distanciómetro como método de acercamiento visual, manualmente se trasladó el sistema hasta avistar una localidad muy cercana a la de los puntos de medición. Una vez ahí, aprovechando la resolución de 0.0125 °/paso del sistema, se inició una búsqueda paso a paso y dado que el telescopio no es suficientemente potente para apreciar la geometría de los prismas, el EDM también cuenta con una señal audible la cual varía en intensidad conforme se acerca o se aleja al lugar en el que se encuentra el reflector. De esta forma la mejor posición para llevar a cabo la medición es identificada.
- Este proceso se repitió para los puntos restantes hasta encontrar todas las ubicaciones, todas ellas referidas a un origen arbitrario, el cual debe mantenerse para efectuar cualquier medición.
- Cabe mencionar que a pesar de la adversidad de las condiciones climáticas y considerando que la medición no depende de la hora del día, los puntos se encontraron a las 22:35 h. tiempo del centro de la Ciudad de México del jueves 10 de agosto del 2000.

La ubicación de los puntos y la distancia a la que se encuentran los mismos se enlista a continuación. Las posiciones se proporcionan respecto a los ejes de giro y están referidas al origen citado anteriormente, las magnitudes de los ángulos están en radianes (con base en la resolución de los motores) y las distancias en milímetros. Cada uno de los puntos es identificado con un número y su nombre.

1. "Las Cruces"	0.2306	0.0663	3 575 960
2. "Canario"	0.0063	0.0168	2 887 920
3. "Texcalco"	0.0239	0.0017	2 750 150
4. "Meseta"	0.1928	0.0366	2 790 450

Tabla 5.2.1.1 ubicación de los puntos de medición

En la fotografía que se muestra a continuación se señalan, de manera aproximada, los lugares donde se localizan los puntos de medición sobre el volcán.

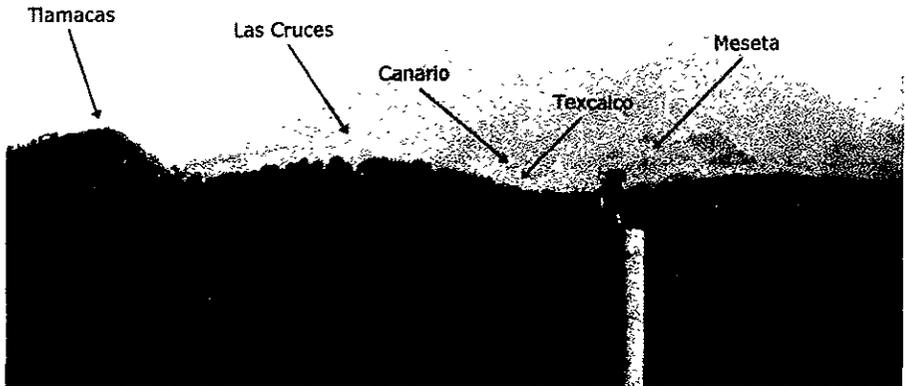


fig. 5.2.1.1 ubicación de los puntos sobre el volcán Popocatépetl.
(Foto: A. Gómez y H. Romero, 1998)

Conclusiones

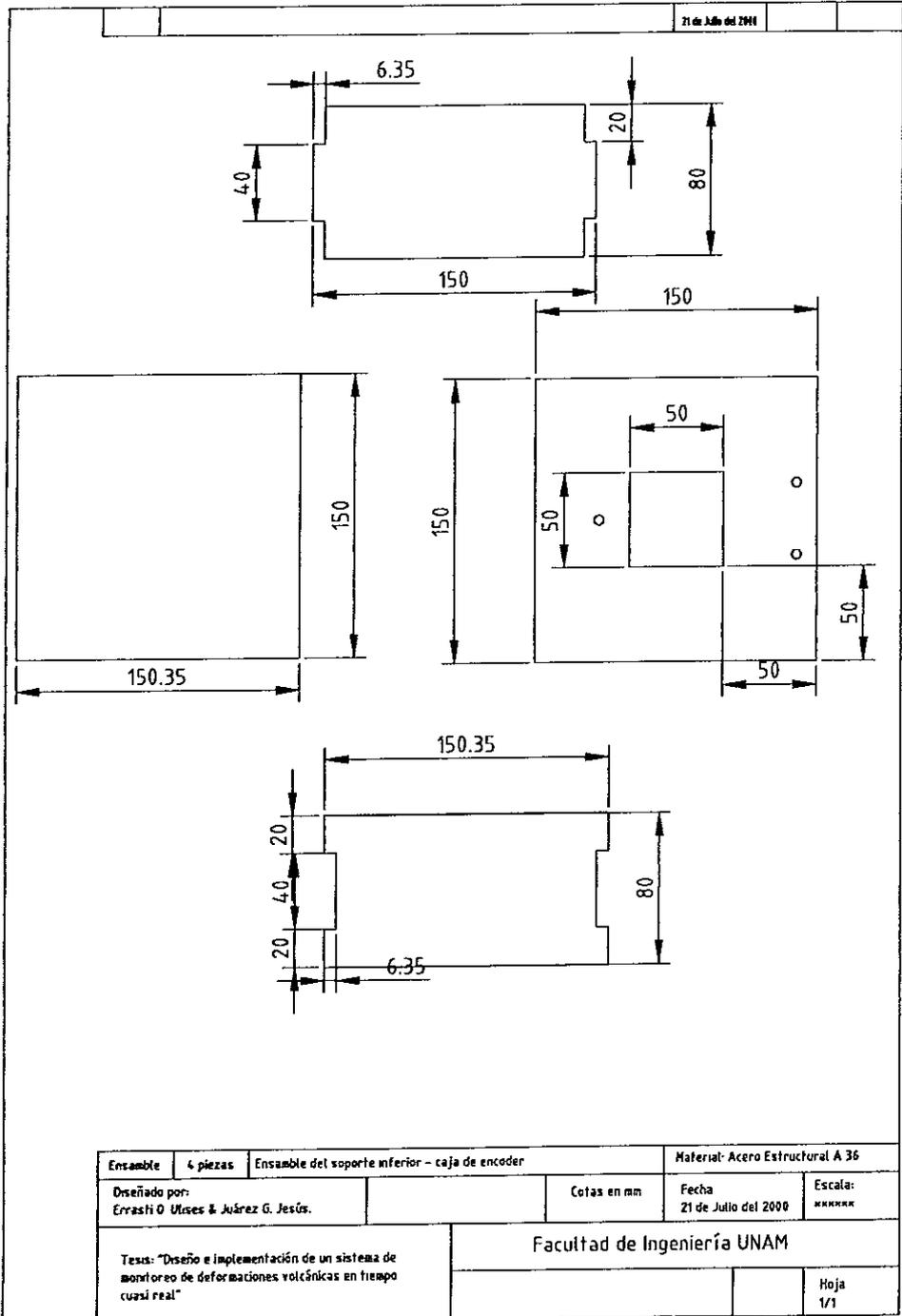
- Se desarrolló un sistema automatizado capaz de monitorear deformaciones en tiempo cuasi real, el cual además tiene la capacidad de buscar el objetivo o reflector en caso de que éste sufra algún tipo de desplazamiento causado por la deformación de la superficie del volcán.
- Ha demostrado ser una herramienta útil en la medición de las distancias debido a que el número de muestras se ha incrementado significativamente y ha sido posible captar eventos de deformaciones de corta duración gracias a la continuidad con la que puede realizarse el monitoreo.
- Las mediciones tomadas en el lugar por especialistas se han reducido considerablemente y en un futuro se espera que solamente haya visitas con propósitos de revisión y mantenimiento de los equipos. Actualmente, dichos especialistas (los que se encargan del monitoreo en Tlamanca) evitan tener que trasladarse hasta el sitio para la obtención de muestras por lo que su trabajo está enfocado directamente al análisis de los datos.
- Con base en la información obtenida y en la experiencia científica de los vulcanólogos en la interpretación de los datos, este sistema podría ser determinante en el momento de tomar de decisiones, cuando en otros sistemas de monitoreo exista ambigüedad y no sea posible establecer un pronóstico.
- Por otra parte se conjuntó un sistema de bajo costo en comparación con los que se le asemejan en el mercado, además de poseer características específicas que lo hacen independiente del número de veces que se ha medido a un objetivo para poder localizarlo en caso de que éste se haya desplazado.
- Se diseñó e implementó un sistema capaz de hacer selecciones por sí mismo por medio de un controlador sencillo el cual está conformado principalmente por dos algoritmos.
- Se concretó un sistema de búsqueda eficiente empleando un algoritmo que genera desplazamiento en forma de espiral cuadrada excéntrica. Esto se debe a que no se realizan búsquedas en un mismo sitio más de una vez durante la rutina de rastreo.

Apéndice A: Costos.

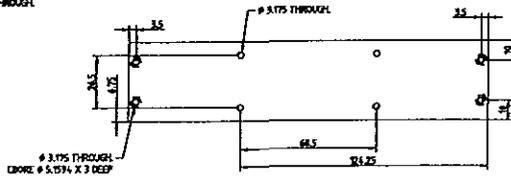
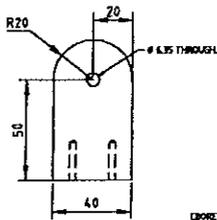
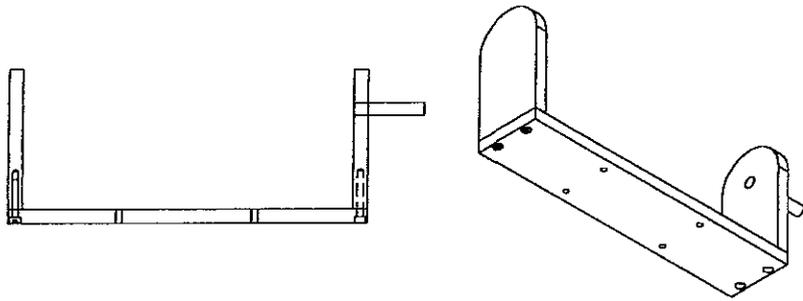
A continuación se presenta una lista con los precios unitarios en dólares de cada uno de los aditamentos que conforman al sistema.

Sistema de Control de Movimiento Quikphase – Optitracker	2200
Distanciómetro Electrónico Láser (Infrarrojo)	5000
Radiomódem uso industrial	2000
CPU con procesador a 400 MHz	440
Tripié de acero recubierto con uretano	130
Soporte de acero estructural	80
Anaquele e instalación de ventana móvil con motor	500
TOTAL:	12790

El total de la inversión es considerando un par de CPU's con las mismas características y un par de radiomódems para la comunicación entre ambas máquinas.

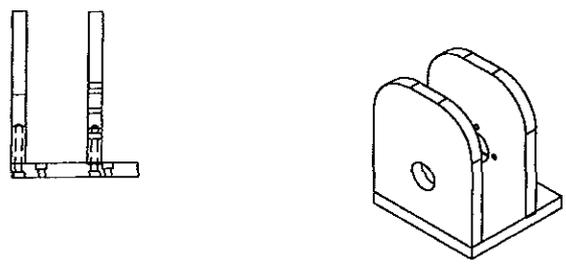
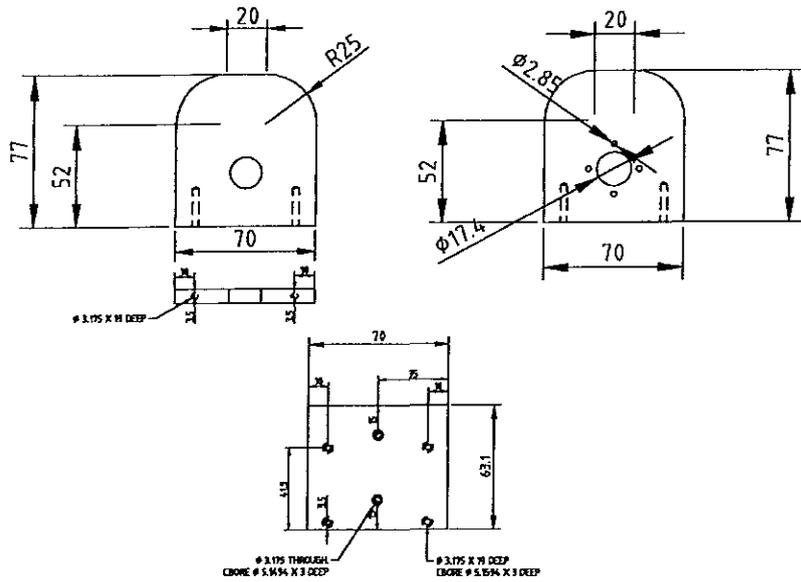


Ensamble	4 piezas	Ensamble del soporte inferior - caja de encoder	Material: Acero Estructural A 36		
Diseñado por: Errasti O. Ulises & Juárez G. Jesús.		Cotas en mm	Fecha 21 de Julio del 2000	Escala: 1:1	
Tesis: "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real"		Facultad de Ingeniería UNAM			
				Hoja 1/1	

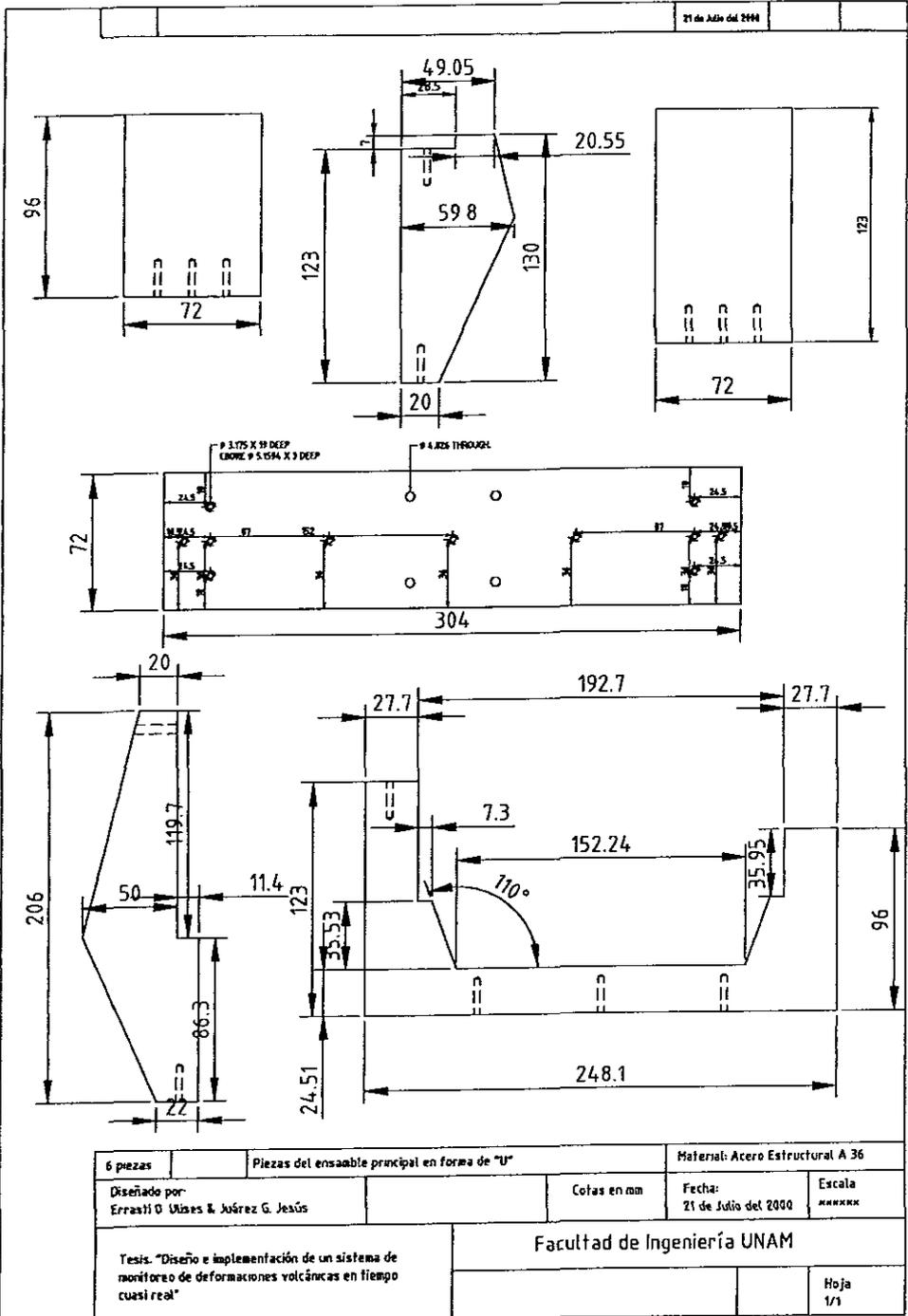


Ensamble	4 piezas	Ensamble del soporte del E.D.M.	Material Acero Estructural A 36		
Diseñado por: Errasti O Ulises & Juárez G Jesús.			Cotas en cm	Fecha: 21 de Julio del 2000	Escala XXXXXX
Tesis: "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real"			Facultad de Ingeniería UNAM		

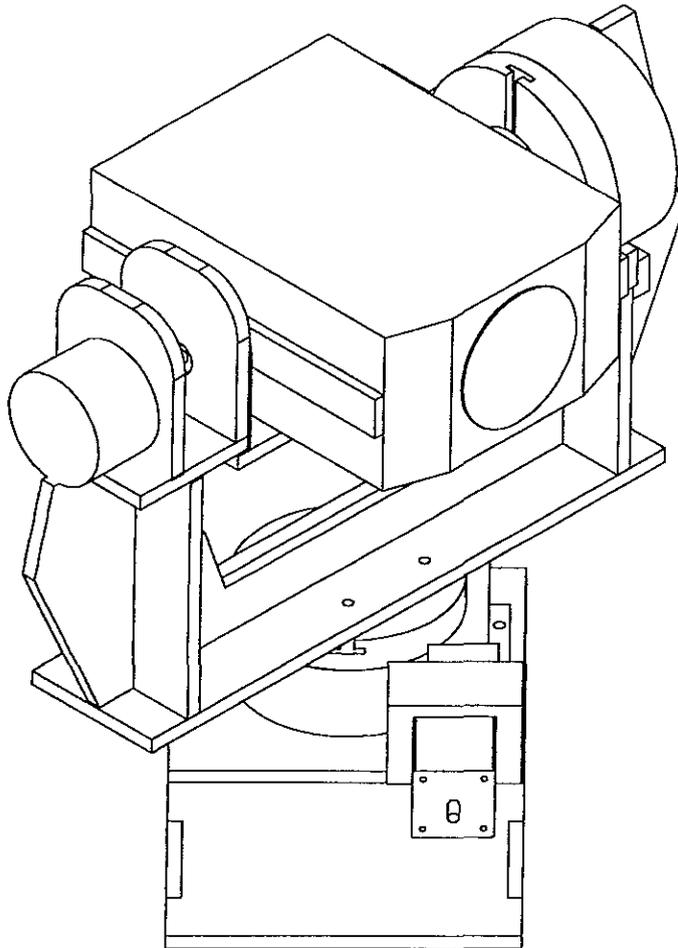
21 de Julio del 2000



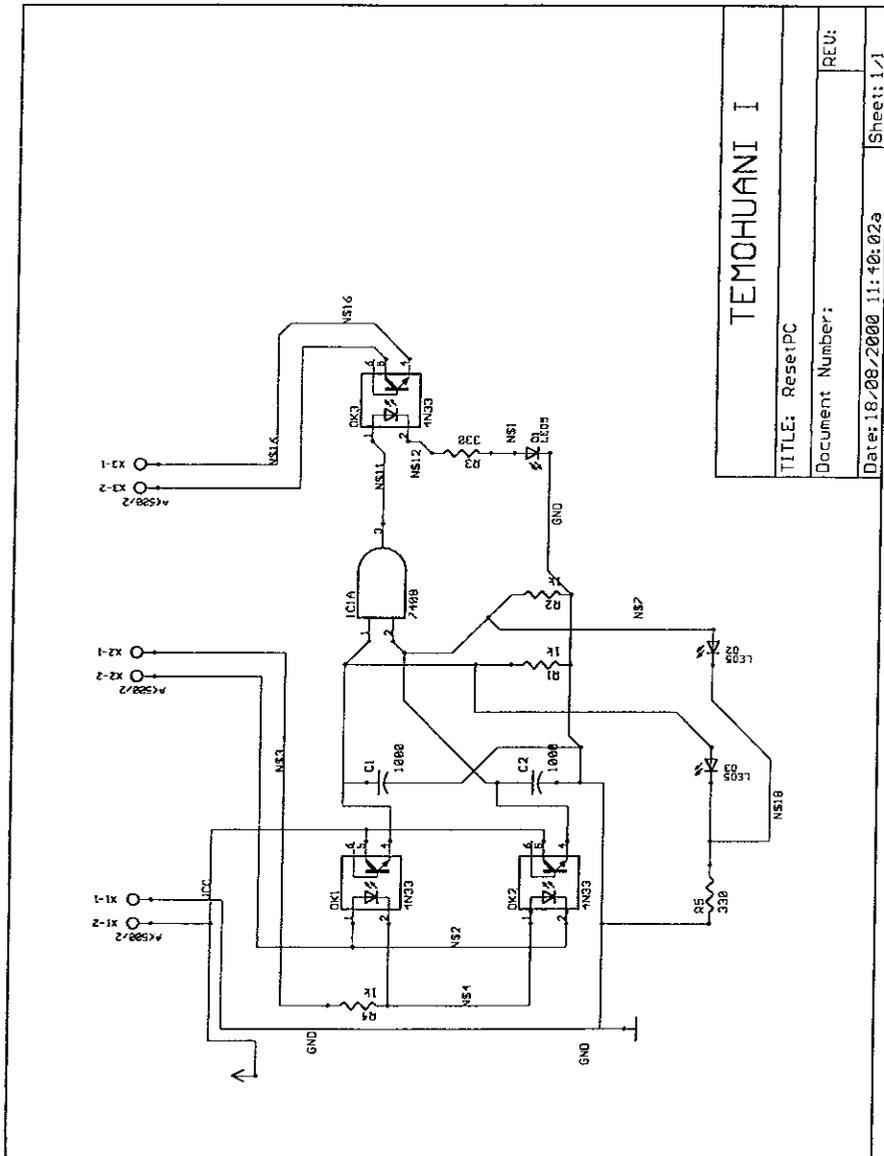
Ensamble	3 piezas	Ensamble del soporte del Encoder	Material: Acero Estructural A 36		
Diseñado por: Errastii D. Urises & Juárez G. Jesús			Cotas en mm	Fecha 21 de Julio del 2000	Escala *****
Tesis "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real"			Facultad de Ingeniería UNAM		



21 de Julio del 2000

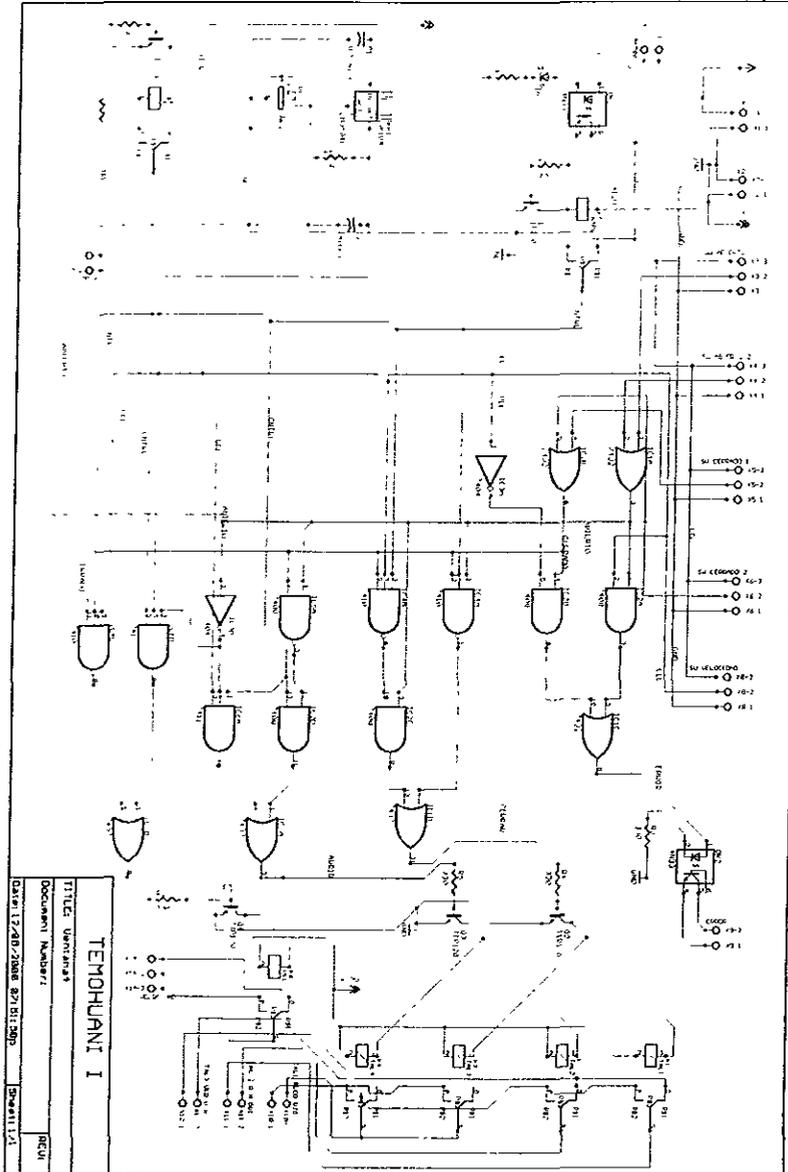


Ensamble	Ensamble del soporte con EDM	Material: Acero Estructural A 36		
Diseñado por: Errasti O Ulises & Juárez G. Jesús		Cotas en mm	Fecha: 21 de Julio del 2000	Escala: 1:1
Tesis: "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real"		Facultad de Ingeniería UNAM		
				Hoja 1/1



TEMCHUANI I

TITLE: Reset PC	REU:
Document Number:	
Date: 18/08/2000 11:40:02a	Sheet: 1/1



RADIOMODEMS

Fabricante: Black Box Corporation.

Modelo: Industrial Modem RF 115

Rango: 32.2 km. (20 millas)

Transmisión de datos (sin comprimir) protocolo RS-232: de 1200 baudios a 115.2 kbaudios (unidireccional) o 57.6 kbaudios (bidireccional).

Interface RS 232: Asíncrona, unidireccional o bidireccional.

Ganancia del sistema: 135 dB

Nivel mínimo de decodificación del receptor: -110 dBm @ 10⁻⁴ raw BER; -108 dBm @ 10⁻⁶ raw BER.

Tipo de modulación: Espectro disperso (Spread Spectrum), GFSK.

Código de dispersión: Saltos de frecuencia (Frequency Hopping).

Formas de salto: se pueden seleccionar 15 diferentes.

Potencia de salida: ajustable de 0.1 a 1 watt.

Detección de error: 32 bits CRC con retransmisión de paquete.

Antena: cuenta con una antena "whip" de 3 pulgadas, se pueden utilizar antenas externas direccionales u omnidireccionales.

Requerimientos energéticos: de 10.5 a 18 VDC, Terminal central positiva, cuenta con adaptador de AC de pared.

Conector: RS-232 de 9 terminales hembra.

Dirección de la unidad: es única y ajustada de fábrica.

Modos de operación: Punto a punto, punto a múltiple, repetidor.

Condiciones de operación: de -40° a +75°C (-40 a +167°F).

Clave FCC: KNY-DGR-115

Clave DOC (Canadá): 229 101 340 A

Dimensiones: 6.4 x 19.1 x 28.7 cm (2.5"H x 7.5"W x 11.3 "D)

Peso: 2 kg. (4.5 lb.)

ANTENAS

Fabricante: MAXRAD.

Modelo: MYA-93012.

Tipo: Direccionales "YAGI".

PROTECTORES

Fabricante: Polyphaser.

Modelo: IS-50NX-C1

Tipo: Protector coaxial contra inducciones.

DISTANCIÓMETRO (E.D.M.)

Marca: Sokkia.
Modelo: RED 2L

Características de comunicación

Estándar de comunicación: RS-232C.
Velocidad de transmisión: 1200 baudios
Códigos de salida/entrada: ASCII
Bit de encendido: 1
Bits de parada: 2
Bits de datos: 8
Paridad: No se usa
Encendido externo: entrada aterrizada.
Parada externa: entrada aterrizada.
Solicitud externa: ninguna
Formato de datos:
 Los datos se transmiten de acuerdo al formato y configuración del instrumento.

	Distancia	SP	CR	LF
	XXXXXXXX			
No. de caracteres	7	1	1	1

En total son 10 caracteres. El grupo de 7 caracteres se reduce a 4 si un código de error está presente para ese dato.

Ejemplo:

Dato de distancia:

Metros	0848004	848.004 metros
Pies	2782160	2782.160 pies

Cuando el valor está en pies el dígito menos significativo siempre es "0".

Alambrado del conector de salida.

1	GND (Tierra)
2	METROS/PIES (+5V= metros, 0V= Pies)
3	SALIDA DE DATOS
4	EMPEZAR/PARAR (+5V Normalmente. Aplique tierra para empezar o para parar
5	+12V DC de salida (Señal LISTO)
6	No Conectar

La corriente de la terminal #5 no debe exceder 10 mA.

Nota: El selector METROS/PIES se posiciona automáticamente a METROS a menos que la terminal #2 se aterrice o que el interruptor del panel se establezca en pies.

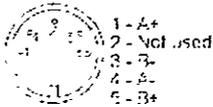
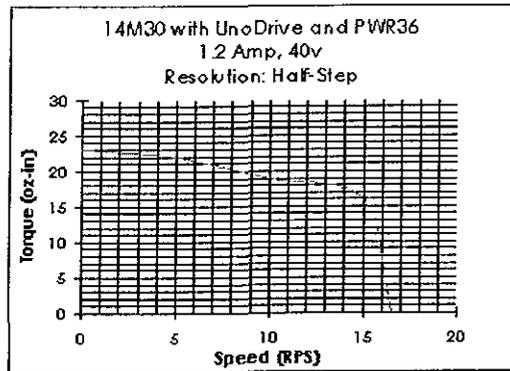
Motores

Proveedor: Microkinetics Corp.
 Número: 14M30
 Par de espera: 30 oz-in
 Inercia del rotor: 109 oz-in²
 Ángulo de paso: 1.8 grados.
 Peso: 0.47 lbs
 Resistencia: 4.3 ohms
 Consumo de corriente: 1.2 A
 Voltaje: 4.8 Volts
 Inductancia: 5.5 mH
 Configuración de cableado:

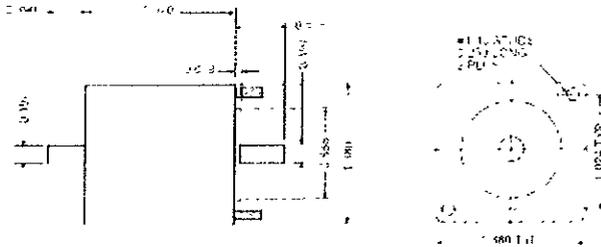
ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA



Diagrama de alambrado 4 cables

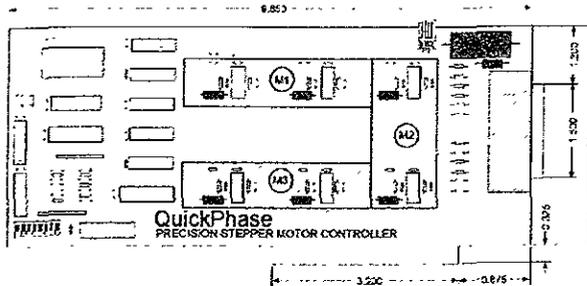


Conector de energía DIN 5 terminales



Dimensiones

Controlador de motores



Fabricante: Microkinetics Corp.

Circuito controlador: cambiador bipolar de corriente constante

Razón de cambio: 20 kHz nominal

Rango de voltaje de operación: 10 – 16 VDC

Corriente de salida: 1 A por fase (Fijo de fabrica)

Señales de entrada: 6 TTL Activas en bajo.

Señales de salida de control auxiliar: 2 TTL Activas en bajo.

Salidas de control de motor: 4 líneas de corriente por eje.

Capacidad de corriente: 0.9 A continuos por fase.

Temperatura de trabajo: 0°C a 70 °C

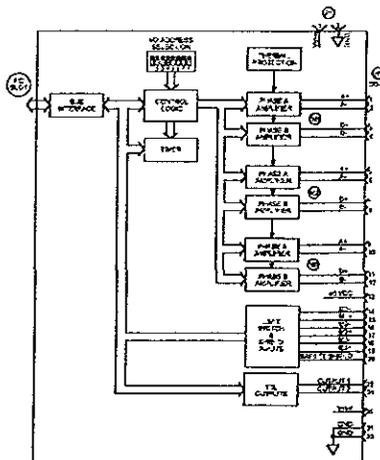
Garantía: 5 años partes y servicio.

Requerimientos:

Ranura de expansión de 8 o 16 bit IBM PC/AT

Fuente de poder de DC para los motores

Diagrama de bloques:



Sensores de posición (Encoders)

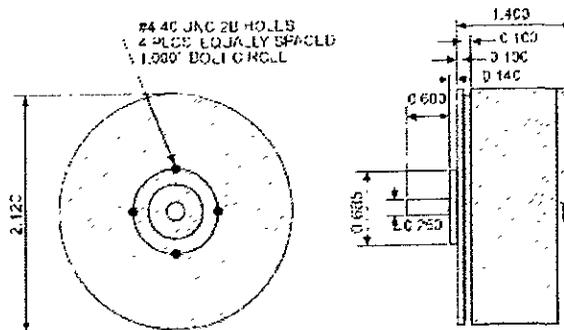
Fabricante: Dynamics Research Corporation

Modelo: M21

Tipo: Encoder rotatorio, óptico e incremental.

Especificaciones mecánicas

Dimensiones	(ver figura)
Peso	2 oz
Tamaño de flecha	0.25 in
Carga en la flecha	Axial 4 lb. Radial 8 lb.
Torque	Arranque <0.5 oz. in. Girando < 0.2 oz. In.
Inercia	1.8×10^{-4} oz. In/sec ²



Especificaciones Eléctricas

Codificación	Incremental
Alimentación	-5 V +/- 10% @ 135 mA. Máx
Salida	Cuadratura de doble canal además de referencia con complementos
Tipo de salida	TTL Buffer/Drive (7406) colector abierto
Corriente máxima	40mA.
Frecuencia de respuesta	100 kHz en datos y 40 kHz en referencia.
Temperatura	Operación de 0-80 °C -25 a 90°C almacenamiento
Conector	Molex 22-01-3087 o equivalente

Interfase para encoders

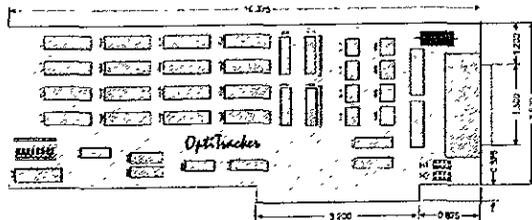
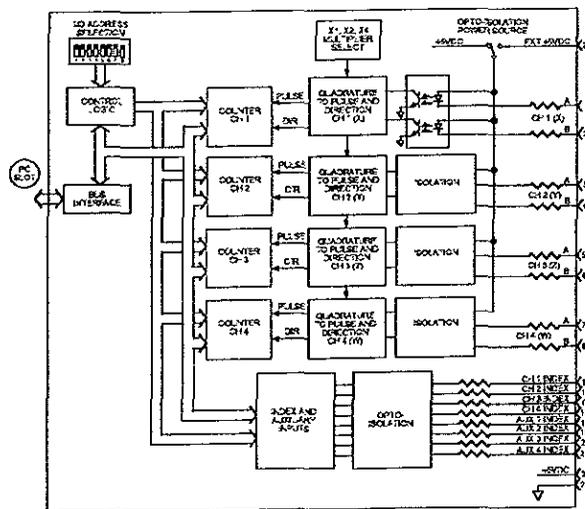
Proveedor: Microkinetics Corporation.

Modelo: Optitracker PC

Especificaciones:

Compatibilidad con encoders	Terminación única, colector abierto
Conector	Estándar DB-25 Hembra
Consumo típico de energía (+5V):	
1 Eje	0.50 A
2 Ejes	0.75 A
3 Ejes	1.10 A
4 Ejes	1.35 A
Dimensiones generales	Largo de 10.5" y ancho de 4.0"
Rango de temperatura de funcionamiento	0°C a 70°C
Garantía	5 años partes y servicio
Requerimientos	Ranura de expansión de 8 o 16 bit IBM PC/AT

Diagrama de bloques:



Mesas Rotatorias

Fabricante: Sherline Products. (E.U.A)

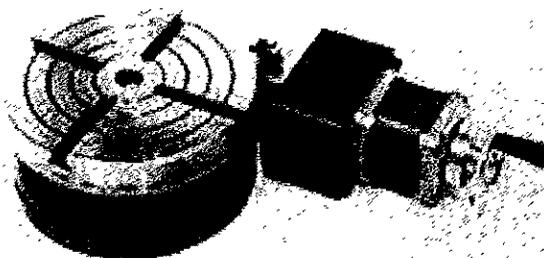
Parte: 3700

Descripción: Mesa rotatoria de 4" (100 mm) de diámetro.

Relación del tornillo sinfín: 72-1 (una revolución del tornillo = 5° de movimiento de la mesa).

Marcas de grado: cada 5° y cada 15°, además de la rueda de mando con 50 graduaciones (una marca cada 1/10 °)

Peso : 7 libras



Notas

- ¹ Gomez Vázquez, A. *Métodos Topográficos Empleados en el Montoreo de la Corteza Terrestre del Volcán Popocatepetl*.
- ² Tilling, R. "Monitoring Active Volcanoes"
- ³ Mc Burney, W. et al. "Volcanology".
- ⁴ Rueguer, J.M. "Electronic Distence Measurement. An Introduction".
- ⁵ Yokoyama, Izumi. "Crustal Deformation Caused by the 1914 Eruption of Sakurajima Volcano, Japan and its Secular Changes". *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*
- ⁷ Beer, F. et al. "Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica".
- ⁸ Schilling, R.J. "Fundamentals of Robotics: Analysis and Control"
- ⁹ Mott, Robert L. "Machine Elements in Mechanical Design"
- ^{10,11} Mott, Robert L. "Resistencia de Materiales aplicada"
- ¹² John Goldie, "Application Note n.º 216 – Summary of well known interface standards-"
- ¹³ Orozco Valdez L.; Fernandez Suarez S., "Diseño de implementación de un sistema de montoreo térmico para el volcán popocatepetl"
- ¹⁴ Ogata, K. "Ingeniería de control Moderna"
- ^{15,16} Grimaldi, R. P. "Matemáticas Discreta y Combinatoria: Introducción y Aplicaciones".
- ¹⁷ Norton, R. "Diseño de maquinaria"
- ¹⁸ Schildt, H. "Turbo C C++ 3.1, Manual de Referencia".

Bibliografía - Hemerografía

Mc Birney, W. y Howell, W. "Volcanology". Freeman, Cooper & CO. E.U.A., 1979. 397 pp.

Tazieff, H. "Forecasting Volcanic Events, Development in Volcanology". Elsevier. Holanda, 1983. 635 pp.

Rueger, J. M. "Electronic Distance Measurement: An Introduction". Springer Verlag. Alemania, 1990. 249 pp.

Beer, F. P. y Johnston, E. R. "Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica". Quinta Edición. Mc Graw Hill. México. 1990. 476 - 1061 pp.

Schilling, R.J. "Fundamentals of Robotics: Analysis and Control". Prentice Hall. E.U.A. 1990. 425 pp.

Mott, Robert L. "Machine elements in Mechanical Design", 2nd ed., Macmillan Publishing Co., Columbus, OH, 1992

Mott, Robert L. "Resistencia de Materiales Aplicada". 3^a Ed. Prentice Hall, México, 1996. 640 pp.

Norton, R. L. "Diseño de Maquinaria". McGraw-Hill. México, 1997. 794pp.

Grimaldi, R. P. "Matemáticas Discreta y Combinatoria: Introducción y Aplicaciones". Addison - Wesley Iberoamericana. México, 1989. 605 pp.

Schildt, H. "Turbo C/C++ 3.1, Manual de Referencia". McGraw-Hill. España, 1994. 1029 pp.

Ogata, K. "Ingeniería de control Moderna". 2da. Edición. Prentice Hall House. México, 1991. 1049 pp.

Maloney, "Electrónica Industrial Moderna", 3ª Edición. Prentice Hall. México, 1997. 845 pp.

Coughlin, Robert F. Frederick F. Driscoll "Operational amplifiers and linear integrated circuits" Prentice Hall, E.U.A. 1991. 502 pp.

Perry, G. "Aprendiendo Visual Basic 5 en 24 horas". Prentice Hall Pearson. México, 1998. 460 pp.

Orozco Valdez, L. y Fernandez Suarez, S. "Diseño de Implementación de un Sistema de Monitoreo Térmico para el Volcán Popocatepetl". Tesis para obtener el título de Ingeniero mecánico electricista área eléctrica electrónica. UNAM 1998.

Gómez Vázquez, A. "Métodos Topográficos Empleados en el Monitoreo de la Corteza Terrestre del Volcán Popocatepetl". Tesis que para obtener el título de Ingeniero Topógrafo y Geodesta. UNAM. Febrero 2000. 103 pp.

Robert I. Tilling. "Monitoring Active Volcanoes", General Interest Publications of the U.S. Geological Survey. E.U.A., 1992.

Yokoyama, Izumi. "Crustal Deformation Caused by the 1914 Eruption of Sakurajima Volcano, Japan and its Secular Changes". Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol. 30. Holanda, 1986. 283 - 302 pp.

Dietrich, J.H. y Decker, R.W. "Finite Element of Surface Deformation Associated With Volcanism". Journal of Geophysical Research. Vol. 80, No. 29. E.U.A., 1975. 4094 - 4102 pp.

Tryggvason, E. "Surface Deformation at the Krafla Volcano, North Iceland, 1982 - 1992". Bulletin of Vulcanology. Vol. 56, E.U.A., 1993. 98 - 107 pp.

Ewert, J.W. y Swanson, D.A. "Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias Empleadas por el Personal del Observatorio Volcanológico Cascades, 1980 - 90". Boletín 1966 del Servicio Meteorológico de los Estados Unidos. E.U.A., 1993. 237 pp.

Heliker, Griggs, Takahashi, and Wright, 1986, Volcano Monitoring at the U.S. Geological Survey's Hawaiian Volcano Observatory, Earthquake Information Bulletin, v.18. n.1., 35 pp.

Lipman, Moore, and Swanson, 1991, "Bulging of the North Flank Before the May 18, 1980 Eruption - Geodetic Data: IN: Lipman and Mullineaux". 1991, The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington, USGS Professional Paper 1250. 147-148 pp.

Iwatsubo, Topinka, and Swanson, 1992, Slope-Distance Measurements to the Flanks of Mount St. Helens, Late 1980 through 1989: IN: Ewert and Swanson (eds.), 1992, Monitoring Volcanoes: Techniques and Strategies Used by the Staff of the Cascades Volcano Observatory, 1980-90, USGS Bulletin 1666. 85 pp.

Yokoyama, Izumi. "Selected Papers on Volcanology of Dr. Izumi Yokoyama". Vol. 1. Saporó. Japón, 1988.

John Goldie, "Application Note # 216 - Summary of well known interface standards-", National Semiconductor; Julio 1998

"Instep - PC, Motion Control Software for the IBM-PC". Document Revision D4. Microkinetics Corporation. E.U.A., 1995. 82 pp.

"OptiTracker - PC, Encoder Feedback Interface for the IBM PC". Document Revision A2. Microkinetics Corporation. E.U.A., 1995. 35 pp.