



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEDICIÓN DE  
DEFORMACIONES CORTICALES, APLICACIÓN AL  
MONITOREO VOLCÁNICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A N:

JAIMES MENDOZA SERGIO  
NÚÑEZ FLORES ÁLVARO

DIRECTOR:

DR. SERVANDO DE LA CRUZ REYNA

CO-DIRECTOR:

ING. ULISES MARTÍN PEÑUELAS RIVAS



Ciudad Universitaria 2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis 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 de este trabajo de tesis fue posible gracias al Instituto de Geofísica y Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED),

Nuestro agradecimiento, al Dr. Servando de la Cruz Reyna por la asesoría y orientación para la realización de esta tesis.

Un muy especial agradecimiento al Ing. Ulises Martín Peñuelas Rivas, de la Facultad de Ingeniería, por todo su apoyo, orientación, paciencia y asesoría en la realización de esta tesis.

## **Agradecimientos Personales:**

A Dios:

Por todas las facilidades y bendiciones otorgadas hasta ahora.

A mi Madre:

Por que gracias a ella he llegado hasta aquí, por todo su amor, por su incondicional apoyo, por su esfuerzo invaluable, y por ser esa mujer excepcional de quien estoy muy orgulloso.

A mi Abuela:

Por sus sabios consejos, por ser siempre incansable, por toda mi formación, por ser la base de la familia y en especial por iluminar siempre mi camino.

A mi Hermana:

Por todo su apoyo e interés, por hacerme sentir orgulloso de ser tu hermano, siempre he querido ser un buen ejemplo, espero no defraudarte.

A Lorna:

Por que me has enseñado el significado de muchas cosas, por que me inspiras, me animas y me tranquilizas, y sobre todo gracias por permanecer a mi lado ya sabes aadys.

A mis Tías y a mis Tíos:

Por todos sus consejos, su apoyo incondicional, por todas sus enseñanzas y más que nada por formar la familia que somos.

A todos mis primos:

A los más pequeños por darme alegrías y risas, y a los medianos sigan adelante y hagan sentir orgullosos a sus padres.

A LA MEMORIA DE MI PADRE  
SERGIO JAIMES ARANDA †

Sergio Jaimes Mendoza

*A Dios:*

Por darme la oportunidad de conocer este mundo maravilloso y haberme permitido concretar los objetivos que me he planteado hasta ahora.

*A mis padres:*

Por brindarme su apoyo incondicional y seguir con entusiasmo todas las actividades que realizo, además, de permitirme ser libre. Gracias a ustedes mi vida tiene sentido.

*A mis hermanos:*

*Rogelio.*

Por sus consejos y actitud en la solución de problemas siempre con humildad.

*Adriana.*

Por ser una persona tenaz, que realiza sus objetivos con esfuerzo y entereza.

*Ricardo.*

Para que siga mejorando día con día en las actividades que realice y las lleve a cabo con empeño y dedicación.

De los tres estoy me siento muy orgulloso, sigamos como hasta ahora por el camino del dialogo, compañerismo y por siempre amigos.

*A mis amigos:*

En especial a *Jesús, Abel, Sergio, Alejandro, Miguel* por brindarme sus consejos, motivación, comprensión y compartir sus momentos agradables conmigo.

*A todos mis amigos y compañeros:*

*Daniel M, Antonia, Enrique, Dirce, Luis Alberto, Ulises, Cesar, Federico, Roberto, Edith, Abigail, Ximena, Hugo, Ruben, Efraín, Karen...*

Por sus ánimos, consejos y ayuda durante mis estudios.

*A todos los que no mencioné:*

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

*Álvaro*

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
Introducción.	1
Capítulo 1: Generalidades sobre la Actividad Volcánica y su Monitoreo.	
1.1    Monitoreo Volcánico.	3
1.2    Medición de Deformaciones Volcánicas.	4
1.3    Técnicas para Medición de Deformaciones Volcánicas.	5
1.3.1    Desplazamientos Verticales.	5
1.3.2    Desplazamientos Horizontales.	9
1.4    Modelos de Deformación.	11
Capítulo 2: Medición de Deformaciones Volcánicas: Antecedentes y Justificación del Sistema.	
2.1    Equipos de Medición.	14
2.1.1    Aparición de los Distanciómetros.	17
2.1.2    Estaciones Totales Topográficas.	17
2.2    Actuadores, Sensores y Control.	19
2.2.1    Actuadores y Sensores de Movimiento.	19
2.2.2    Dispositivos de Control.	20
2.3    Sistemas Anteriores.	21
2.4    Justificación del sistema.	22
Capítulo 3: Parte Mecánica del Sistema.	
3.1    Importancia del Sistema Mecánico.	25
3.2    Ensamble Mecánico.	26
3.2.1    Configuración Geométrica.	27
3.3    Sistema de Movimiento.	28
3.4    Descripción de las Mesas Rotatorias M-495CC.	31

## ÍNDICE

	Pág.
Capitulo 4: Parte Electrónica del Sistema.	
4.1 Sobre el ESP 300.	32
4.1.1 ¿Qué es el <i>Controller/Driver</i> ESP 300?	32
4.2 Sobre el Distanciómetro Leica DI3000.	34
4.2.1 Principio Físico.	35
4.2.2 Control Remoto del DI3000.	37
4.3 Generalidades sobre Comunicación Serial y RS-323.	38
4.3.1 Comunicación Serial.	38
4.3.2 RS-232 (RS-232-C, RS-232).	39
4.4 Radiomódems.	45
4.5 Desarrollo de la Tarjeta Electrónica.	47
4.5.1 El PIC.	47
4.5.2 El Circuito Integrado Max-232.	49
4.5.3 Funciones de la Tarjeta Electrónica.	50
4.5.4 Conexiones.	52
Capítulo 5: Programación y Control.	
5.1 Controlador y Microcontrolador.	53
5.1.1 Diferencias entre un Sistema <i>“embedded”</i> (implantado) y una PC.	55
5.2 Programación.	55
5.2.1 Planteamiento del Problema.	55
5.2.2 Compilador CCS C.	57
5.2.3 Programa para el PIC.	59
5.2.4 Protocolo de Comunicación del Sistema.	60
5.2.5 Programa en <i>Visual Basic</i> .	63
5.3 Sobre La Rutina de Búsqueda.	70
Conclusiones.	73
Apéndices.	
Apéndice A: Esquemáticos y Conexiones.	75
Apéndice B: Tablas de Especificaciones.	80
Apéndice C: Diagramas de Flujo.	84
Bibliografía.	88

## INTRODUCCIÓN.

Considerando la necesidad de la vigilancia permanente de volcanes activos en México, personal del Instituto de Geofísica de la UNAM y del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), se ha dado a la tarea de monitorear diferentes manifestaciones precursoras volcánicas, como sismicidad, imágenes térmicas, composición química de emisiones fumarólicas y agua de manantiales, y deformaciones del edificio volcánico.

Actualmente operan varios equipos e instrumental, que proporciona información útil para el análisis del comportamiento volcánico. El monitoreo de deformaciones se logra a través de diferentes técnicas e instrumentos electrónicos y mecánicos de precisión que se describen brevemente en el primer capítulo.

Uno de los métodos más confiables para la determinación de deformaciones horizontales de un edificio volcánico es la medición electrónica de distancias sobre rangos de varios kilómetros.

El monitoreo de grandes estructuras volcánicas requiere la utilización de una red geodésica capaz de abarcar todo el edificio volcánico y poder controlar cualquier deformación que en él se produzca, usualmente las distancias a cubrir son del orden de kilómetros (1 a 15 [km]), que deberán medirse con precisiones del orden de milímetros (3 a 5 [mm]). Las tecnologías de distanciómetros electrónicos (*EDM-Electronic Distance Measurement*) permiten ya conseguir estos órdenes de magnitud. Las redes geodésicas observadas con distanciómetros electrónicos y teodolitos de alta precisión se diseñan de manera que se pueda medir desde la periferia del volcán una serie de puntos situados en sus laderas

Se han establecido redes geodésicas exitosas en varios volcanes remotos y logísticamente difíciles (p.e. volcán Pagan, Islas Marianas; volcanes Mayon y Bulusan, Filipinas; Nevado del Ruiz, Colombia y Mount St Helens, Estados Unidos)<sup>1</sup>. Dichas redes permiten la toma diaria de medidas importantes para el monitoreo de estos volcanes, especialmente el establecimiento e implementación de la red de deformación en el cráter y el domo del Mount St Helens ha sido bastante exitoso. Técnicas que varían desde medidas simples con cintas métricas a redes que utilizan instrumentos electrónicos han ayudado a predecir la mayoría de los episodios de construcción del domo<sup>2</sup>.

En los últimos años se ha incrementado el uso de distanciómetros electrónicos gracias a su precisión, la capacidad de detectar deformaciones de corta duración, su rango de medición y la facilidad con que estos pueden ser operados.

---

<sup>1</sup> Tilling I. Robert, "Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos", publicado por Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, Santa Fe Nuevo México, USA 1989.

<sup>2</sup> Iwatsubo, Eugene Y; Swanson, Donald A." Métodos usados para vigilar la deformación del piso del cráter y del domo de lava en el Mount St. Helens, Washington.", Washington, USA; 1993.



A raíz de la actividad presentada por el volcán Popocatepetl, se estableció una red geodesica para medir deformaciones en el flanco norte del volcán, con base en los estudios realizados y gracias a esta red, fue posible el desarrollo de un primer sistema automatizado basado en distanciómetros electrónicos.

Tomando como propósito principal dar continuidad al proyecto de diseño de un sistema automatizado para monitorear deformaciones volcánicas, la presente tesis tiene por objetivo detallar los procedimientos seguidos para el diseño y fabricación del sistema sucesor para el monitoreo de deformaciones volcánicas, así como proporcionar información específica que sirva como documentación y referencia para la continuidad del proyecto.

# **CAPITULO 1: GENERALIDADES SOBRE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA Y SU MONITOREO.**

## **1.1 MONITOREO VOLCÁNICO.**

México se encuentra en una región con un gran número de volcanes, algunos de ellos con actividad importante. Existen alrededor de 3000 volcanes en el país de los cuales 14 son considerados activos<sup>3</sup>. Es evidente que esta situación representa una amenaza seria a la población que se incrementa con el crecimiento continuo de las áreas urbanas.

Durante el siglo XX ocurrieron varias erupciones de diferente magnitud. La más importante tuvo lugar en marzo-abril de 1982 en el volcán Chichón, Chiapas, la cual causó la muerte de unas 2,000 personas y destruyó nueve poblados constituyéndose en la peor catástrofe de índole volcánica en México.<sup>4</sup>

La experiencia más reciente fue en 1993 cuando el volcán Popocatepetl inició un incremento en su actividad y a finales de 1994 pasó de una fase de actividad precursora a un estado de actividad eruptiva con importantes emisiones de gases y cenizas.

Con base en estas experiencias se hace de vital importancia establecer de manera oportuna sistemas de vigilancia y monitoreo en todos los volcanes potencialmente riesgosos del país, que permitan determinar el estado de su actividad y detectar comportamientos o variaciones que indiquen los precursores y el inicio de una fase eruptiva mayor.

Una manera de evaluar la actividad de un volcán y el nivel de riesgo que representa es a través de la vigilancia sistemática de parámetros geofísicos mediante diversas metodologías e instrumentos, aplicando estos de manera correcta y en forma anticipada en las fases de bajo nivel de actividad que puedan anteceder a un proceso eruptivo. Es posible en muchos de los casos detectar un cambio en las características o en el nivel de actividad del volcán, que inclusive podría conducir a un pronóstico y en algunos casos a una predicción en corto plazo de un proceso eruptivo.

---

<sup>3</sup>Quaas Weppen, Valdés González, Guevara Ortiz, E. Ramos, De la Cruz-Reyna; "Monitoreo volcánico: Instrumentación y Métodos de Vigilancia", Documento 8613 México, D.F., Julio 1995 Disponible en [http://www.crid.or.cr/crid/CD\\_Alerta\\_Temprana/pdf/spa/doc8613/doc8613.htm](http://www.crid.or.cr/crid/CD_Alerta_Temprana/pdf/spa/doc8613/doc8613.htm)

<sup>4</sup> Macías Vázquez José Luís, Instituto De Geofísica, UNAM; Capra Pedol Lucia, Instituto De Geografía, UNAM; "El Peligro Volcánico en México"; Disponible en [http://www.geofisica.unam.mx/vulcanologia/volcanes/peligro\\_volcanico.html](http://www.geofisica.unam.mx/vulcanologia/volcanes/peligro_volcanico.html)

## **1.2 MEDICIÓN DE DEFORMACIONES VOLCÁNICAS**

Entre las facetas más importantes de la vulcanología está la predicción, vigilancia y control de las erupciones. Con esta finalidad en muchas regiones con volcanismo activo existen observatorios que disponen del instrumental adecuado para analizar una serie de fenómenos que preceden o acompañan a los procesos eruptivos. Uno de los objetivos de estos centros de investigación es conocer, con la máxima antelación, el emplazamiento y naturaleza de las erupciones para tomar las medidas que reduzcan en lo posible su acción destructiva.

Una técnica de predicción se basa en el establecimiento de una red geodimétrica permanente para medir las pequeñas deformaciones que se producen en la superficie como consecuencia del empuje ascendente del magma. En los periodos de aparente calma, se verifican lentas deformaciones tanto verticales como horizontales, y en algunos volcanes se han observado bruscos e importantes abombamientos superficiales en los días que preceden a la erupción.<sup>5</sup>

La medida de las deformaciones de un volcán también está indicada por la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI), como uno de los cuatro parámetros fundamentales recomendados para mantener un nivel básico de vigilancia sobre un volcán activo junto con las observaciones directas, las sismológicas y las geoquímicas de fumarolas y de manifestaciones hidrotermales<sup>6</sup>.

En México se han realizado trabajos de deformación a través de métodos geodésicos, principalmente en los volcanes Popocatépetl y de Fuego en Colima. La evaluación de las deformaciones incluye medidas de las componentes horizontal y vertical de los desplazamientos. Para el primer caso, se cuenta con métodos geodésicos, como son triangulación, trilateración, triangulateración. Para el segundo caso se emplean técnicas de nivelación geométrica y trigonométrica. Para medir la inclinación del terreno se utilizan métodos de inclinometría seca y electrónica.

## **1.3 TÉCNICAS PARA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES VOLCÁNICAS.**

Las técnicas utilizadas habitualmente son las que se utilizan en geodesia y por ello aplicadas regularmente con equipos topográficos. La instrumentación que se requiere debe ser siempre de muy alta precisión, deben alcanzar regularmente resoluciones del orden de una parte por millón [mm/km] midiendo en ocasiones a distancias de varios kilómetros a pesar de que los desplazamientos en algunos volcanes pueden ser mayores en ordenes de magnitud.

---

<sup>5</sup> Araña Saavedra Vicente, "Volcanismo Dinámica y Petrología de sus Productos", Editorial Istmo, Madrid España.

<sup>6</sup> Barberi et al. 1990.

### **1.3.1 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES.**

Cambios medibles en el desplazamiento vertical de puntos de nivelación a causa de terremotos y actividad volcánica han sido reconocidos desde hace mucho tiempo. Sin embargo, las mediciones de triangulación solo pueden detectar cambios a gran escala. Para la mayoría de los objetivos de monitoreo volcánico, los movimientos verticales pueden ser medidos con precisión mediante las técnicas descritas a continuación.

#### **Nivelación de precisión.**

La técnica de monitoreo volcánico mas ampliamente utilizada para medir desplazamientos verticales es una técnica convencional de levantamiento topográfico llamada nivelación de precisión, en la cual se relaciona los cambios de elevación en los puntos de medición a alguna base arbitraria generalmente referida al nivel del mar o a un punto fijo distante, esta técnica tiene el mejor limite de detección de cambios de elevación. Los principios generales y la instrumentación utilizados en la nivelación de precisión son bien conocidos y están descritos en textos de geodesia y topografía.

Las principales ventajas de la nivelación de precisión son: 1) su excelente precisión y disponibilidad generalizada del equipo necesario inclusive para países en vías de desarrollo; 2) el levantamiento o hundimiento medio puede ser representado en forma de mapa; 3) los datos proporcionan la mejor base para el modelaje del volumen y profundidad de la intrusión magmática.

Algunas desventajas de esta técnica son: 1) demanda de trabajo intenso y largo tiempo de medición; 2) difícil realizarla en pendientes pronunciadas; 3) en algunos volcanes es difícil si no imposible realizar las mediciones durante el invierno, la época de lluvias, o durante periodos de actividad eruptiva.

#### **Cambios en el nivel de agua.**

El nivel de un cuerpo de agua puede proporcionar una referencia útil para reconocer y medir los desplazamientos verticales relativos de puntos de referencia u horizontes en la masa de tierra adyacente al volcán.

Si los cambios en el nivel de agua son lo suficientemente grandes o rápidos, el levantamiento o hundimiento relativo puede ser detectado visualmente en las modificaciones en las orillas o en la superficie del suelo, tales como la emersión o sumersión de sitios arqueológicos (monumentos, muelles, edificios, paredes) o rasgos geológicos o geomorfológicos prehistóricos (bancos de conchas, arrecifes de coral, playas o terrazas levantadas, bancos cortados por olas). Las variaciones en elevación de horizontes asociados con ciertos organismos acuáticos (algas, escaramujos) también proporcionan evidencia de cambios en el nivel tierra-agua.

En general, los cambios de nivel de agua en respuesta a la deformación del suelo son demasiado pequeños y graduales para ser observados visualmente. Sin embargo, dichos cambios pueden ser medidos con precisión por medio de mareógrafos, transductores de presión u otros instrumentos.

Los mareógrafos vienen en una variedad de modelos, pero la mayoría tiene un flotador ajustado a un cable, el cual a su vez acciona un registro a papel.

Los datos mareográficos pueden ser registrados en forma continua ya sea permanentemente o por un período de tiempo dado cada año o estación para llenar vacíos entre levantamientos topográficos poco frecuentes y obtener así una historia completa del levantamiento o hundimiento. Un monitoreo muy exacto y continuo del nivel de agua también puede ser realizado por un transductor de presión fijo en el fondo del mar o de una laguna o en un pozo cercano a la orilla.

En todas estas mediciones periódicas, se debe tener cuidado en la reducción de datos, ya que hay que efectuar correcciones por efecto de mareas normales, olas, vientos, y otros factores locales. Para que las medidas periódicas del nivel del agua produzcan datos útiles para el monitoreo volcánico, las variaciones observadas necesitan ser mediblemente más grandes que aquellas asociadas a perturbaciones transientes de origen no volcánico.

### **Cambios en la pendiente del volcán (inclinación del suelo o terreno).**

La asociación entre cambios en la inclinación de la superficie del terreno con sismos y actividad volcánica fue reconocida en Japón y Hawai a comienzos del siglo 20 por medio de registros de sismómetros de péndulo horizontal. A finales de los años 20 de este siglo, se comenzó a desarrollar y a probar instrumentos en base a péndulo diseñados específicamente para medir la inclinación, el "clinógrafo" en Japón y el "clinoscopio" en Hawai.

El inclinómetro de tubo de agua desarrollado por Hagiwara (1947) marcó un avance tecnológico significativo ya que eliminó muchos de los problemas de inestabilidad presentes en instrumentos anteriores. Desde entonces, la medición precisa de la inclinación, tanto periódica como continua, se ha convenido en una herramienta integral en el monitoreo moderno de los volcanes. En las técnicas descritas aquí, los cambios en inclinación pueden ser determinados con una precisión de unos pocos microradianes<sup>7</sup>. Hay muchas técnicas diferentes para llevar a cabo mediciones de la inclinación, cada una con sus propias ventajas y desventajas, pero todas enfrentan un serio problema común: la estabilidad del sitio y fuentes de ruido extrañas.

---

<sup>7</sup>  $10^{-6}$  de radián; [ $\mu$ rad] Un microradián es equivalente al ángulo recorrido por una tabla de 1 km de longitud si uno de sus extremos es levantado o bajado en 1 [mm] (0.206 segundo de arco).

## **Configuraciones ("húmedas" y "secas") para la medición de la inclinación.**

Los sistemas iniciales para la medición de la inclinación utilizaron el principio de la autonivelación de un líquido, comúnmente agua, y por lo tanto se conoce como las mediciones "húmedas" de inclinación, "inclinometría húmeda". Típicamente, un sistema de "inclinometría húmeda" involucra mediciones ópticas de los cambios en el nivel de agua en dos o más envases interconectados por tubos de agua y aire (para igualar la presión). La distancia o "base" entre los envases de medición puede ser "corta" (unos cuantos metros) o "larga" (decenas de metros); manteniendo constantes los demás factores, mientras más larga sea la base, mayor será la precisión del instrumento. Al utilizar puntos de medida unidos sea en configuraciones ortogonales o triangulares, un sistema de inclinometría húmeda proporciona tanto la cantidad como la dirección del cambio de inclinación entre dos lecturas.

Empíricamente, inclinaciones con magnitudes de 4 a 10 [ $\mu$ rad] pueden ser medidas confiablemente con este método. Al final de la década de 1960 se desarrolló el llamado método de "inclinometría seca", con el objeto de complementar y reemplazar el método de inclinometría húmeda.

Las mediciones de inclinometría seca son casi tan exactas ( $\pm 3$  a  $4[\mu$ rad]) como las de inclinometría húmeda y tienen algunas ventajas importantes: 1) la técnica puede ser utilizada en pendientes un poco más fuertes (de esta manera se incrementa el número posible de sitios de medida); 2) las mediciones son sencillas y rápidas; y 3) el equipo es de fácil transporte y puede ser cargado manualmente. El método de inclinometría seca proporciona un medio de monitoreo comparativamente eficaz y de bajo costo en muchos sitios de un volcán que presenta cambios relativamente grandes en la inclinación, en el orden de decenas de microradianes en un período de semanas a meses.

## **Inclinómetros electrónicos.**

Los sistemas inclinométricos portátiles, sean de tipo húmedo o seco, tienen la desventaja de que sólo permiten un monitoreo periódico. Sin embargo los inclinómetros electrónicos miden los cambios de inclinación de manera verdaderamente continua, durante las 24 horas del día, sin importar las condiciones atmosféricas. Por lo tanto, éstos pueden detectar indicadores precursores de desarrollo rápido que podrían ser pasados por alto durante un monitoreo periódico. También ofrecen otras características útiles: 1) son capaces de detectar cambios de inclinación más pequeños que aquellos detectables por medio de técnicas de inclinometría seca o húmeda; 2) tienen un rango dinámico alto y ajustable; 3) algunos instrumentos modernos son portátiles y pueden ser utilizados en sitios difíciles o imposibles de ser monitoreados por otras técnicas; 4) los registros continuos de las variaciones de inclinación pueden servir como guía para fijar los cronogramas para la toma de medidas periódicas de las redes de campo con el objeto de incrementar la probabilidad de registrar cambios en la inclinación en un plazo corto; y 5) pueden proporcionar datos inclinométricos por

telemetría desde zonas remotas o peligrosas sin ningún riesgo para el observador. Los inclinómetros electrónicos, sin embargo, también tienen algunas desventajas serias. Son muy costosos comparados con las técnicas inclinométricas seca o húmeda, en términos de gastos iniciales de compra e instalación, así como también de operación, mantenimiento y procesamiento de los datos.

### 1.3.2 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES.

La inflación o deflación pre-eruptiva causa tanto deformación horizontal como desplazamientos verticales en un edificio volcánico (Fig. 1.1). La componente horizontal de la deformación del terreno puede ser monitoreada por mediciones con teodolito, mediciones con distanciómetro electrónico (EDM), extensómetros y líneas de fractura. La técnica de EDM ha suplantado ampliamente a las mediciones angulares con el teodolito y tal vez proporcione la mejor medida para la determinación rápida de la deformación horizontal integrada a una amplia zona del volcán, ya que las distancias entre los puntos de medición pueden llegar a tener hasta decenas de kilómetros.

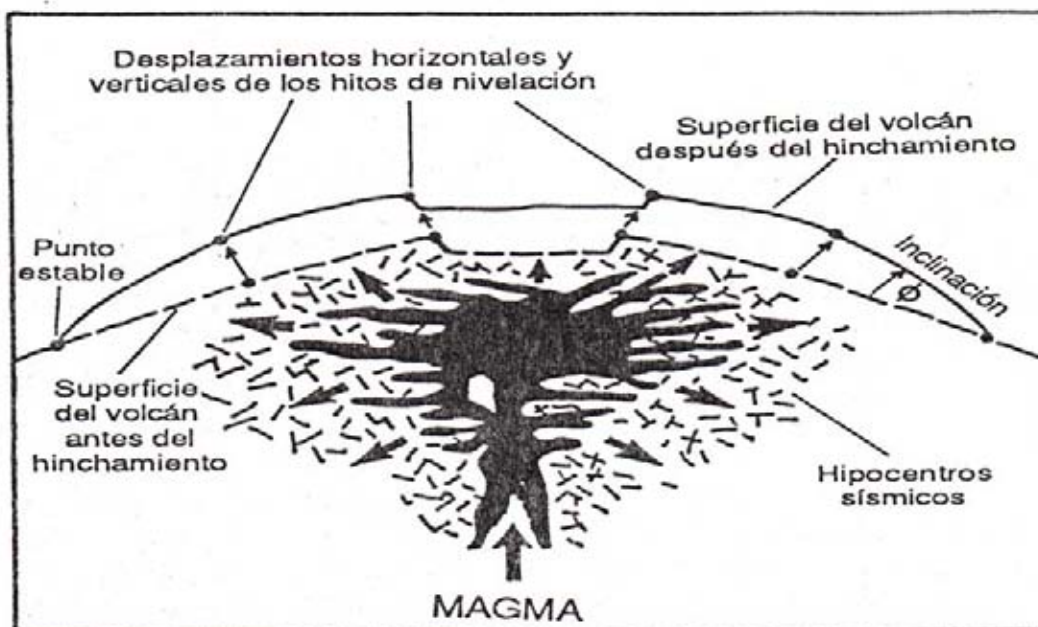


Fig. 1.1 Representación esquemática de algunos indicadores precursores que pueden ser medidos por medio de monitoreo sísmico y deformación del suelo;  $\phi$  indica el cambio en el ángulo de la pendiente de la superficie del volcán (inclinación).<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Tilling I. Robert, "Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos", publicado por Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, Santa Fe Nuevo México, USA 1989. Pág. 52

## **Medición electrónica de la distancia. (EDM-*Electronic Distance Measurement*).**

El método EDM utiliza la transmisión coherente de un rayo láser desde el instrumento ubicado sobre una base hacia un reflector ("blanco") situado sobre un punto de medición. El desfase que se produce durante el tiempo que necesita la luz para viajar hasta el reflector y de vuelta al instrumento transmisor es proporcional a la distancia entre los dos puntos. Las mediciones usualmente se expresan en términos de distancia inclinada, es decir la distancia real entre los dos puntos. Mediante cálculos geométricos sencillos se puede determinar la distancia horizontal. Algunas líneas pueden tener ángulos verticales de hasta  $25^\circ$ , pero la mayoría tiende a ser menores o pueden llegar a ser aproximadamente horizontales; los cambios medidos son referidos simplemente como deformación horizontal, a no ser que se especifique lo contrario.

Con un número adecuado y bien distribuido de líneas de medición, los vectores del movimiento horizontal pueden definir el centro de inflación<sup>9</sup>. En teoría, los cambios menores a 1 [ppm] deberían ser detectables por la mayoría de instrumentos, si las mediciones están sujetas a una corrección. En la práctica, la incertidumbre es del orden de 3 a 8 [ppm], ya que la longitud de las líneas es generalmente mayor a 1 [km], correcciones atmosféricas normalmente no pueden ser llevadas a cabo en su totalidad, y los errores del operador son inevitables. Este nivel de precisión es por lo general adecuado para detectar una deformación horizontal de entre 1 [cm] y 1 [m] por 1 [km] de longitud de línea de medida, comúnmente observada en volcanes bien vigilados.

Las mediciones de EDM tienen las siguientes ventajas: 1) son más rápidas por unidad de área vigilada que los levantamientos a nivel e inclinométricos; 2) requieren de menos mano de obra por unidad de área vigilada; 3) pueden detectar mejor las intrusiones de magma profundas que los estudios de inclinometría o nivelación; y 4) hoy en día, representa la única manera práctica de campo para la obtención de datos de deformación horizontal en la vigilancia volcánica.

Las desventajas más importantes de las medidas de EDM son: 1) el equipo es costoso; 2) es necesaria la línea de visión entre puntos; 3) se requieren condiciones atmosféricas buenas a lo largo de toda la línea de visión para cada medida y durante todo el tiempo de medición en la red.

---

<sup>9</sup> Ver sección 1.4 del presente Capítulo



### **Configuraciones de EDM para monitoreo.**

En lo posible, una red de EDM debería estar compuesta por líneas estables de base interconectadas a configuraciones triangulares de líneas, también denominada red de triangulación. Sin embargo, muchos volcanes son demasiado pendientes, demasiado peligrosos, o demasiado remotos para permitir la realización programada de medidas repetitivas en una configuración triangulada. En tales casos, mediciones repetitivas de configuraciones lineales simples con reflectores emplazados permanentemente pueden proporcionar suficiente información.

### **Medidores de deformación (extensómetros).**

Los medidores de deformación, desarrollados ampliamente para aplicaciones ingenieriles, presentan una amplia gama tanto en diseño como en objetivos. Por lo general, el uso de medidores de deformación en el monitoreo volcánico se restringe a medir las contracciones o extensiones a través de zonas con movimiento reconocible (fisuras y fallas). El problema principal de estos instrumentos es que solo muestrean las extensiones puntuales, en una zona de a lo más algunos metros.

### **Mediciones manuales en líneas de fractura.**

Un método simple y directo para medir desplazamientos horizontales en fracturas activas son las medidas periódicas, con una cinta estándar de acero para agrimensura, de las distancias entre puntos de referencia en una configuración lineal (a veces llamadas "líneas de fractura") a través de una o más fracturas radiales, fisuras, fallas inversas y otras rupturas superficiales. Tales rasgos se encuentran por lo común en las cercanías de un centro de emisión. Debido a que el uso de estas técnicas de "baja tecnología" puede requerir el trabajar en áreas de posible peligro en las cercanías de centros de emisión activos, se debe considerar cuidadosamente la seguridad del personal que realiza las medidas, tanto en el diseño como en la conducción de tales monitoreos. Asimismo, las deformaciones en las zonas de fractura no son representativas de las deformaciones elásticas generadas por fuentes de presión profundas.

### **Comparaciones Fotográficas.**

Las comparaciones fotográficas pueden proporcionar otro método de bajo costo para detectar deformación debido a algunos procesos volcánicos. La comparación puede ser cualitativa o semicuantitativa. Un ejemplo de comparación cualitativa sería la detección de nuevas fracturas, hinchamiento, y otros indicadores de deformación por comparación de fotografías aéreas o de superficie tomada antes y después de la actividad.

Para producir datos semicuantitativos, las fotografías a ser comparadas tienen que haber sido tomadas desde la misma localidad, elevación y ángulo con el mismo sistema de lentes de la cámara, y con la inclusión de algún factor escala (dos o más rasgos morfológicos prominentes o marcas artificiales). El monitoreo semicuantitativo podría también incluir el establecimiento de estaciones fotográficas en puntos cuyas tomas se repiten periódicamente, con la cámara posicionada a una misma altura de trípode y apuntada a referencias fijas y utilizando factores de escala.

## **Redes GPS.**

El sistema GPS durante muchos años se presentó como una opción demasiado costosa, ya que para poder alcanzar precisiones del orden de [cm] era necesario contar con receptores de alta precisión que eran de un elevado costo. Durante esta época la técnica que se utilizaba consistía en situar una serie de marcas, que se observaban periódicamente con un mínimo de dos receptores de doble frecuencia. La medición de cada punto duraba horas y se debía planificar para disponer de las posiciones de los satélites adecuadas que permitiera obtener la máxima precisión.

Hoy en día el sistema GPS ha mostrado una considerable mejora en la precisión de las medidas y ya es posible alcanzar resoluciones del orden de [cm] con receptores de una sola frecuencia, y son varios los volcanes donde existen redes GPS con receptores de bajo precio. Pero es posible alcanzar una precisión mas alta operando el sistema en modo diferencial.

### **1.4 MODELOS DE DEFORMACIÓN.**

La interpretación de los datos de deformación solo es útil si es referida al comportamiento anterior del volcán mismo, mientras mas amplia sea la información de este comportamiento mejor será la interpretación de los datos.

Ya se sabe que con el incremento de la actividad volcánica se presenta la aparición de deformaciones en su estructura. Estas deformaciones pueden originarse debido a diversas causas, como pueden ser intrusión o desplazamientos de magma en el interior del volcán. Por lo general una inyección de magma produce una inflación del cuerpo del volcán. Y cuando se presenta una deflación generalmente ocurre una migración de magma o una desgasificación en el interior del volcán.

Si se cuenta con una serie de redes para determinar los desplazamientos tanto verticales como horizontales así como la inclinación del terreno, se podrán analizar los datos en referencia de un modelo teórico de deformación que permite extraer información sobre el estado interno del volcán y con ello a un pronóstico de su actividad más confiable.

## MODELO DE MOGI.

En 1958 K. Mogi elaboró un modelo para estimar la deformación provocada en una superficie por una inyección magmática que causa un aumento de presión en una cámara esférica<sup>10</sup>.

El modelo de Mogi presenta varias consideraciones teóricas preliminares:

- La corteza terrestre es un cuerpo ideal elástico. Cuando ocurre una primera deformación la corteza se comporta como un cuerpo elástico, pero a medida que la deformación se prolonga la corteza se comporta como un cuerpo elástico-viscoso.
- La deformación de la corteza es causada por un cambio en la presión hidrostática de una fuente de forma esférica situada a cierta profundidad.

El modelo de Mogi considera al material en el interior del cuerpo volcánico causante de la deformación como una fuente de forma esférica de radio  $r$  localizada a una cierta profundidad  $f$ , conformada como cuerpo elástico semi-infinito y de comportamiento homogéneo, que ejerce una presión  $P$  sobre las paredes de la esfera que originan un cambio de volumen de dicha esfera (ver Fig.1.2).

Del modelo de Mogi se obtienen las siguientes expresiones para los desplazamientos horizontales  $dh$  y verticales  $dv$  para los puntos localizados a una distancia  $d$  del punto  $A$  y donde  $r/f < 1$ .

$$dh = \frac{3r^3 P}{4\mu} \cdot \frac{d}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \qquad dv = \frac{3r^3 P}{4\mu} \cdot \frac{f}{(f^2 + d^2)^{3/2}}$$

En donde:

$dh$  = desplazamientos horizontales

$dv$  = desplazamientos verticales

$r$  = radio de la fuente esférica de presión

$P$  = exceso de presión en la fuente

$\mu$  = rigidez de la corteza

$f$  = profundidad donde se localiza la fuente de presión

$d$  = distancia radial horizontal al centro de presión

---

<sup>10</sup> Mogi K. (1958), "Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surfaces surrounding them". Bull. Earthquake Res. Inst. 36: 99-134).

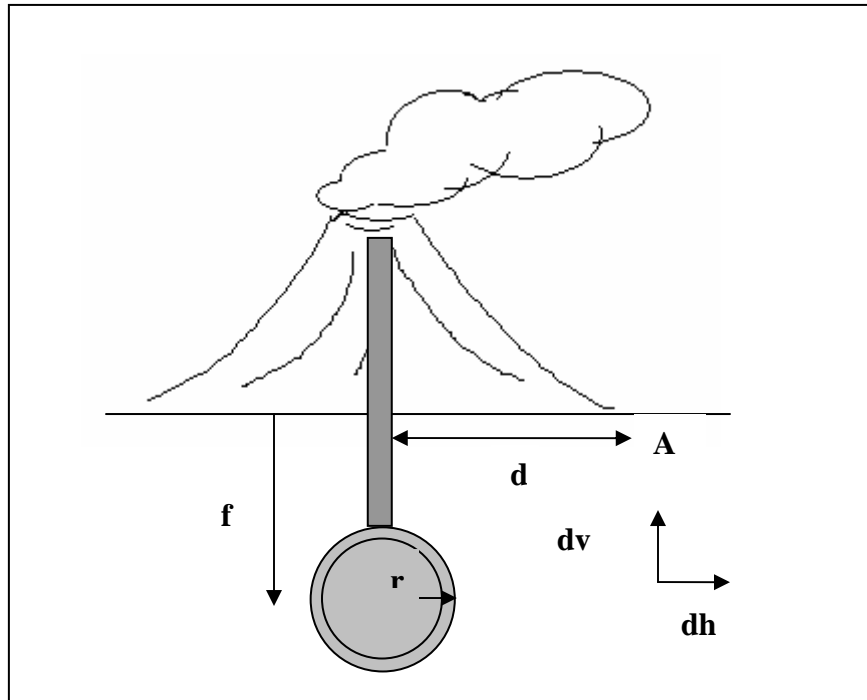


Fig. 1.2 Modelo de Mogi<sup>11</sup>

El modelo matemático de Mogi representa el desplazamiento absoluto esperado como función de la distancia radial al epicentro de la fuente de presión y de su profundidad. En general desconocemos las dimensiones de la fuente esférica y lo que estas han variado pero, si conocemos  $dh$  y  $dv$  en cada punto, podremos calcular donde esta el centro de la deformación. La variación en el tiempo de la deformación nos puede dar indicación de si el epicentro cambia con el tiempo, es decir si se esta produciendo un proceso de ascenso del magma.

Por ello la capacidad de medir deformaciones horizontales en forma automatizada representa una poderosa herramienta para la evaluación de la condición interna de un volcán y el riesgo que representa.

<sup>11</sup> Los autores

## CAPITULO 2: MEDICIÓN DE DEFORMACIONES VOLCÁNICAS ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION DEL SISTEMA.

### 2.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN.

Las técnicas para medir las deformaciones mencionadas en el capítulo 1 están casi en su totalidad basadas en el empleo de los instrumentos utilizados usualmente en topografía y geodesia. La evolución de estos instrumentos repercute también en la evolución de estas técnicas y en una mejora considerable en la rapidez de medición, resolución, confiabilidad y precisión.

A continuación se describen brevemente algunos de los instrumentos que se utilizan comúnmente en la determinación de deformaciones

-Teodolito.

El teodolito es un instrumento de medición mecánico-óptico universal que sirve para medir ángulos verticales y, sobre todo, horizontales, ámbito en el cual tiene una precisión elevada. Con otras herramientas auxiliares puede medir distancias y desniveles, y también se emplea para comparar las direcciones hacia dos o más puntos, así como la inclinación de tales direcciones (ver Fig. 2.1).



Fig. 2.1 Dibujo de corte del teodolito Kern DKM2-A<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Disponible en: <http://www.precisiontopografica.com/glosario.htm>

- Niveles.

Un nivel es un instrumento que nos representa una referencia con respecto a un plano horizontal. Este aparato ayuda a determinar la diferencia de elevación entre dos puntos con la ayuda de un estadal<sup>13</sup>.

El nivel mas sencillo es el nivel de manguera, es una manguera transparente, se le introduce agua y se levantan ambos extremos, por simple equilibrio, el agua estará al mismo nivel en ambos extremos.

El nivel de mano es un instrumento también sencillo, la referencia de horizontalidad es una burbuja de vidrio o gota, el clisímetro es una versión mejorada del nivel de mano incorporando un transportador metálico permitiendo hacer mediciones de inclinación y no solo desnivel.

El nivel fijo es la versión sofisticada del nivel de mano, este en lugar de sostenerse con la mano se coloca sobre un tripie, la óptica tiene más aumentos y la gota es mucho más sensible. Este nivel presenta una problemática, y es que conforme se opera el aparato hay que estar verificando continuamente y sobretodo cuando se gira, que la gota siga centrada.

Este problema se resolvió con el nivel basculante, que sigue siendo un nivel fijo, pero que tiene un tornillo para ajustar la gota cada que se hace una medición.

Un gran adelanto se logró cuando se introdujo el compensador automático, dando lugar al nivel automático, su funcionamiento esta basado en un péndulo que por gravedad, en estado estable este siempre estará en forma vertical, y con la ayuda de un prisma, este nos dará la referencia horizontal que estamos buscando.

Por ultimo están los niveles electrónicos (ver Fig. 2.2), estos funcionan como los niveles ópticos, y adicionalmente pueden hacer lecturas electrónicamente con estadales con código de barras, esto resulta muy practico, ya que la medición es muy rápida, y se eliminan errores de apreciación o lectura, estos niveles cuentan con memoria para almacenar y procesar los datos, pueden desplegar en pantalla una resolución de décima de milímetro, y medir distancias con una resolución de un centímetro.

---

<sup>13</sup> Mira o Estadal: Regla graduada de 3, 4, 5, 6 [m]. Colores usuales negro y rojo sobre fondo blanco, las graduaciones principales a intervalos de 1 [cm], suele estar graduada cada 10 [cm] y cambia de color cada metro. La resolución de la lectura es de 1 cm.



Fig. 2.2 nivel electrónico vista posterior<sup>14</sup>.

- GPS topográficos.

Existen GPS de una banda y de dos bandas de frecuencia, la diferencia es que para los GPS de una banda se garantiza la precisión milimétrica para distancias menores a 40km entre antenas, en los GPS de dos bandas es de hasta 300 [km], si bien se pueden realizar mediciones a distancias mayores, ya no se garantiza la precisión de las lecturas.

Los GPS topográficos requieren dos antenas, y se dice entonces que se está trabajando en modo diferencial. La diferencia en precio de un GPS de una banda contra uno de dos bandas puede ser muy grande, y lo es más cuando los GPS de dos bandas incorporan la función RTK (*Real Time Kinematic*). La forma de trabajar con equipos que no incorporan la función RTK es: trasladar los equipos a campo, se hacen las lecturas, pero es solo hasta que se regresa al gabinete que se obtienen las mediciones, con un sistema RTK, los datos se obtienen directamente en campo y el alto precio de estos equipos es por que incorporan una computadora, y un sistema de radio comunicación entre las dos antenas.

- Distanciómetros.

Los distanciómetros son instrumentos que sirven para medir distancias de forma electrónica y óptica, con ayuda de unos prismas<sup>15</sup> o reflectores, el funcionamiento y principio de operación de estos instrumentos en particular del modelo utilizado para el desarrollo del proyecto se encuentran detallados en el capítulo 4 sección 3 de esta tesis, para los fines que este capítulo persigue es más importante conocer su evolución e influencia en las técnicas de medición como se explica en la siguiente sección.

---

<sup>14</sup> Disponible en: <http://www.precisiontopografica.com/glosario.htm>

<sup>15</sup> Accesorio reflectante utilizado para que sobre él rebote la radiación de láser o infrarrojos producida por un distanciómetro y poder así medir distancias.

### **2.1.1 APARICIÓN DE LOS DISTANCIÓMETROS.**

En la medida de distancias la instrumentación sufre variaciones importantes a través de la historia. Los teodolitos comienzan a hacerse más ligeros y precisos y quizás el punto crítico de una nueva era en la medida de distancias y por tanto en la topografía sea cuando en 1948 aparece el geodímetro, un instrumento electro-óptico capaz de medir distancias de varios kilómetros con precisión de centímetros y en unos cuantos minutos. Unos diez años después aparecen los aparatos de microondas (telurómetros) que confirmaban las expectativas creadas por el geodímetro. No obstante, es a finales de los años setenta cuando se consiguen instrumentos electro-ópticos ligeros, cómodos y relativamente baratos conocidos como distanciómetros, que originan una verdadera revolución en la topografía ya que todas las metodologías hasta entonces, estaban diseñadas según la instrumentación existente, que hasta esos momentos conseguía medir de manera cómoda y precisa los ángulos, pero no así las distancias<sup>16</sup>. Con la aparición del distanciómetro las técnicas de medición de distancias cambian y el enfoque de la instrumentación en la vulcanología se vuelve mas extenso, agregando un parámetro importante para el monitoreo de volcanes.

### **2.1.2 ESTACIONES TOTALES TOPOGRÁFICAS.**

La medida de distancias a través de la radiación electromagnética es decir con ayuda de los distanciómetros fue muy utilizada durante los años setenta, pero es en los años ochenta cuando se construyen distanciómetros de poco peso y volumen y con un precio adecuado para cualquier usuario. Así mismo en esos años comienzan a aparecer los teodolitos electrónicos que poco a poco van sustituyendo a los teodolitos ópticos y constituyendo con un distanciamiento integrado, la estación total.

Se dice que un instrumento es una estación total por que incorpora un distanciómetro a un teodolito electrónico y un microprocesador.

Algunas de las características que se encuentran en una estación total, y con las cuales no cuentan los teodolitos por si solos, son pantallas de cristal líquido (*LCD Liquid Crystal Display*), leds<sup>17</sup> de avisos, iluminación independiente de la luz solar, calculadora, distanciómetro, seguidores de trayectoria y la capacidad de almacenar y procesar información, lo cual permite utilizarla posteriormente en computadoras.

---

<sup>16</sup> Piña Paton Benjamín, "Evolución en la captura y el tratamiento de la información geográfica con fines cartográficos", Revista Internacional de Ciencias de la Tierra MAPPINGINTERACTIVO, Julio de 1999 Cáp. 3.3 APARICIÓN DE LA DISTANCIOMETRÍA.

<sup>17</sup> Diodo emisor de luz.



## FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTACIONES TOTALES.

El instrumento mide ángulos a partir de marcas hechas en discos transparentes. Las lecturas de distancia se realizan mediante medios electromagnéticos con la ayuda de prismas ubicado en el punto donde se quiere tomar la medida. Algunas estaciones totales presentan la capacidad de medir a sólido, lo que significa que no es necesario un prisma reflectante, aunque esto por lo general sólo es posible a distancias cortas (ver Fig. 2.3).

Este instrumento permite la obtención de coordenadas de puntos respecto a un sistema local y/o arbitrario. Para la obtención de estas coordenadas el instrumento realiza una serie de lecturas y cálculos sobre ellas y demás datos suministrados por el usuario. Las lecturas que se obtienen con este instrumento son las de ángulos verticales, horizontales y distancias. Otra particularidad de este instrumento es la posibilidad de incorporarle datos como coordenadas de puntos, códigos, correcciones de presión y temperatura, etc.

La precisión de las medidas es del orden de la diezmilésima de gonio<sup>18</sup> en ángulo y de milímetros en distancias, pudiendo realizar medidas en puntos situados entre 2 y 5 [km] según el aparato.

Esta ultima características es la que las presenta como instrumentos de poca confiabilidad para el uso específico de medición de deformaciones volcánicas ya que debido a que el instrumento se encuentra a poca distancia (2 y 5 kilómetros) del volcán a medir, este también puede estar sujeto a deformaciones provocadas por el volcán lo que provoca que las medidas obtenidas no sean del todo referidas a un sistema fijo.

Sin embargo no se puede descartar la idea de que la tecnología de estos instrumentos continúe avanzando rápidamente y pronto puedan representar una opción accesible y lo suficientemente confiable para la medición de deformaciones volcánicas e inclusive para el análisis de estos datos.

---

<sup>18</sup> gonio =  $\pi/200$  [rad]



Fig. 2.3 Estación total TDM5005 Marca Leica<sup>19</sup>.

## **2.2 ACTUADORES, SENSORES Y CONTROL.**

### **2.2.1 ACTUADORES Y SENSORES DE MOVIMIENTO.**

Actualmente las estaciones totales, además de las características antes mencionadas, incluyen para su funcionamiento actuadores de alta precisión.

Actuadores más eficientes proporcionan al dispositivo más estabilidad y facilidad de control así como aumento en la precisión. Particularmente los actuadores que mas se ajustan a los requerimientos de este prototipo son algunos servomotores con módulos de potencia, control y comunicaciones integrados; motores con relaciones potencia – peso – tamaño – energía muy eficientes; actuadores lineales y rotacionales de alta precisión, algunos con muy bajo juego entre partes y poca histéresis; servomotores acoplados directamente a la carga, para reducir el juego.

Existen en el mercado una amplia gama de productos que cumplen con estas características, algunos de ellos tienen aplicaciones industriales específicas y otros pueden ser utilizados casi para cualquier ambiente de trabajo.

---

<sup>19</sup> Disponible en [http://www.instop.es/estatotales/leica\\_tdm5005.php](http://www.instop.es/estatotales/leica_tdm5005.php) portal Web de INSTOP Distribuidor oficial de Leica Geosystems.

## 2.2.2 DISPOSITIVOS DE CONTROL.

Para desempeñar sus funciones de manera correcta y sistemática las actuales estaciones totales llevan integrado un sistema de control que determina las funciones de su sistema motriz y su sistema de medición y en algunos casos de tratamiento de datos, es importante hablar de los dispositivos de control como un antecedente directo ya que de él depende en gran medida el desarrollo de la presente tesis.

En un sistema los dispositivos de control influyen de manera directa y en gran medida en el desempeño, gracias a ellos se pueden incrementar la exactitud de los sensores, hacer mejoras notables en la precisión de los movimientos de los actuadores y lograr movimientos más suaves, eficientes y reales en algunos casos.

Todo esto es posible porque los actuales dispositivos de hardware soportan complejos algoritmos en forma de software, gracias a que se ha incrementado su capacidad de memoria y su rapidez de procesamiento. Los microcontroladores<sup>20</sup> actuales, que integran un microprocesador, memoria, puertos de entrada y salida en un solo componente de bajo costo y gran desempeño son un ejemplo claro de la evolución de los dispositivos de control actuales.

Con estos dispositivos se pueden plantear soluciones de tipo modular, sistemas de control con tareas distribuidas y específicas para mejorar la confiabilidad del sistema.

Finalmente el control utilizando una PC (*Personal Computer*) ofrece una gran flexibilidad en la programación y a diferencia de los microcontroladores<sup>21</sup> esta cuenta con grandes capacidades de memoria, gran rapidez para procesar y comunicar datos y también es posible interactuar fácilmente con actuadores y sensores a través de interfases que suelen tener una alta compatibilidad con las PC's.

---

<sup>20</sup> ver Sección 4.5.1 de la presente tesis.

<sup>21</sup> ver Sección 4.5.1 de la presente tesis.

## 2.3 SISTEMAS ANTERIORES.

En el volcán Popocatepetl, a raíz de las manifestaciones fumarólicas detectadas desde 1993, se estableció en el flanco norte del volcán una red geodésica<sup>22</sup>, con el objeto de detectar deformaciones. Gracias a esta red se realizaron estudios hechos recientemente sobre la deformación del volcán<sup>23</sup>, y fue posible el desarrollo de un sistema, basado en la medición con distanciómetros electrónicos láser.

En 1999 comenzó el proyecto para desarrollar el primer sistema automatizado para el monitoreo de deformaciones volcánicas. Dentro de este proyecto se desarrollo el primer prototipo funcional llamado "Temohuani I" y entró en operación en el año 2000. La documentación, avances y desarrollo del mismo se puede encontrar en la tesis de licenciatura que lleva el título "Diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real" y que sirvió para obtener el grado de ingenieros mecánicos de la UNAM a los estudiantes que participaron en el proyecto.

Este sistema es capaz de monitorear deformaciones en tiempo casi real, la medición se llevaba a cabo empleando un EDM y reflectores o prismas, para apuntar el EDM a una serie de prismas colocados en los flancos del volcán se utilizaron motores paso a paso. El control del sistema estaba a cargo de dos PC's y tarjetas electrónicas que servían en algunos casos para acondicionar señales o acoplar módulos de control. Este sistema por si solo tiene la capacidad de buscar el prisma, en caso de que este saliera de su rango de medición. Su bajo costo en comparación con sistemas similares, su precisión y su confiabilidad lo colocaron en ese momento como una herramienta útil y una muy buena opción para el monitoreo volcánico de deformaciones.

Sin embargo el sistema tenía algunas desventajas, principalmente la falta de mantenimiento y dificultad de ensamble hicieron que este sistema dejara de funcionar después de más de 6 años de operación. Por otro lado las desventajas que estaban directamente ligadas con su diseño eran: el juego entre las partes que conformaban la parte mecánica del sistema, la resolución máxima que ofrecían sus motores y principalmente la complejidad de su ensamble e instalación en el lugar de operación.

Con el desarrollo de éste prototipo se pudo obtener valiosa información que se utilizó para iniciar y concluir la fase de diseño del ensamble mecánico y la selección de los sensores y actuadores que se utilizaron en el prototipo final de el cual trata la presente tesis. En este diseño se incluyen mejoras en el desempeño y eficiencia de funcionamiento del sistema motriz, facilidad para el ensamble, reducción de peso, simplicidad para la instalación y operación de la parte mecánica del sistema.

---

<sup>22</sup> Servando de la Cruz Reyna.

<sup>23</sup> Servando de la Cruz Reyna, Ángel Gómez Vázquez.

El desarrollo del diseño conceptual y la documentación así como las especificaciones de diseño, requerimientos, diseño de detalle de la parte mecánica del prototipo se encuentran completamente detalladas en la tesis de maestría que tiene por nombre “Diseño de un sistema automatizado de segunda generación para el monitoreo continuo de deformaciones volcánicas”<sup>24</sup>.

Sin embargo en el capítulo siguiente se pretende abordar de manera superficial las funciones, especificaciones técnicas y algunos aspectos relacionados con esta parte del sistema.

## **2.4 JUSTIFICACIÓN DEL SISTEMA.**

Se han descrito ya algunas de las técnicas empleadas para medir deformaciones volcánicas y también se mencionaron algunos de los instrumentos de medición más comunes que se utilizan en estas técnicas. Casi todos ellos a excepción de las estaciones totales, requieren de la presencia de un usuario u operador en el lugar de trabajo, que usualmente resulta ser un lugar con riesgos potenciales por ubicarse en las cercanías del volcán que se quiere monitorear y la mayoría de las veces estos volcanes son activos.

Las ventajas de contar con un sistema que pueda recabar datos en forma automática y de manera remota, repercuten directamente sobre la seguridad de las personas encargadas del monitoreo. Adicionalmente puede ser posible mejorar la facilidad de trabajo del investigador o persona encargada del monitoreo, en el desarrollo del proceso de obtención de los datos, claro que esto siempre dependerá de la eficiencia del sistema implementado. Una reducción en los tiempos de procesamiento de la información y un conocimiento más detallado de los datos obtenidos con el sistema son también una ventaja.

Gracias a la implementación del primer sistema<sup>25</sup> se ha visto que la manera más eficiente para medir las deformaciones es empleando un distanciómetro láser (EDM). Para poder medir la distancia de un punto en el volcán, desde un lugar alejado, es necesaria la colocación de prismas o reflectores<sup>26</sup>, sobre la superficie del volcán, los cambios en esta distancia pueden ser interpretados como una deformación del edificio volcánico<sup>27</sup>.

---

<sup>24</sup> Errasti O.U., “Diseño de un sistema automatizado de segunda generación para el monitoreo continuo de deformaciones volcánicas”; Tesis de maestría Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2006.

<sup>25</sup> Errasti O.U., Juárez G.J.A., Huerta R.M.A., “Diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real”; Tesis de licenciatura Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2000.

<sup>26</sup> ver Sección 4.3 de la presente tesis.

<sup>27</sup> ver Capítulo 1 de la presente tesis.

El proceso de colocar el distanciómetro en la dirección correcta para obtener la medida de distancia del punto a medir, de manera manual es un proceso que requiere cierta precisión, tiempo y habilidad por parte del operador. El tamaño de los prismas, cuyo diámetro es del orden de 5 [cm], representa una dificultad. Apuntar con el haz láser que utiliza el distanciómetro a un objeto de ese tamaño, desde una distancia de varios kilómetros y en forma frecuente requiere de una alta precisión y buena repetibilidad.

Usualmente el haz láser incorporado en los distanciómetros no es totalmente puntual, este diverge conforme van avanzando por el medio. La divergencia nos indica cuanto es el ángulo de apertura del láser. Este ángulo es directamente proporcional al área de cobertura en el extremo en el que se encuentra el prisma, y es inversamente proporcional a la potencia con la que recibe el prisma al haz.

Partiendo de lo anterior un desplazamiento pequeño en el distanciómetro se traduce como un desplazamiento de mayor magnitud en el sitio donde se localiza el prisma por lo tanto es indispensable contar con un sistema de movimiento que permita desplazamientos muy pequeños.

Particularmente para el proyecto el haz láser utilizado por el distanciómetro, considerando que la distancia promedio entre el distanciómetro y los prismas es de 3 [km] y de  $0.0125^\circ$  de manera angular, presenta desplazamientos del orden de 0.65 [m] (ver Fig. 2.4).

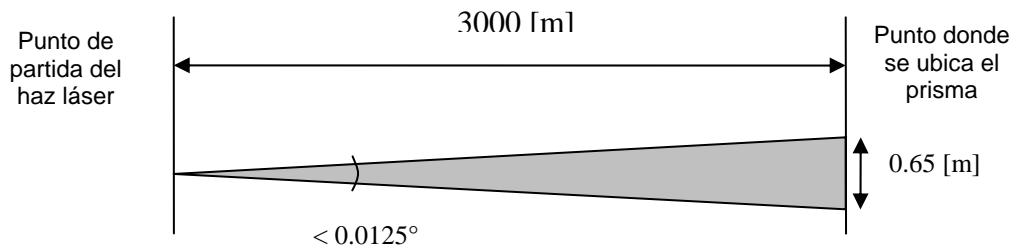


Fig. 2.4 Comportamiento aproximado del haz láser entre dos puntos a una distancia de 3000 [m].<sup>28</sup>

Aunado a esto, usualmente en el monitoreo de deformaciones es necesario medir no solo un punto si no varios, lo que incrementa la dificultad y el tiempo para la obtención de los datos de deformación.

Bajo el esquema anterior se tomó, desde los inicios del proyecto Temohuani 1, la decisión de diseñar y fabricar un sistema automatizado que fuera capaz de apuntar a varias posiciones predefinidas que corresponden a las posiciones en las

<sup>28</sup> Los autores.

que se encuentran los prismas en el volcán, accionar el distanciómetro, tomar las lecturas, enviarlas al centro de monitoreo desde el lugar en el cual se hace la medición y pueda ser operado de manera remota.

Algunas de las ventajas que trae consigo contar con un sistema de este tipo son:

- Mayor seguridad para la persona encargada del monitoreo.
- Los itinerarios de medición no dependen de la presencia de alguna persona.
- Menor costo ya que se reducen los gastos de transporte de personal y equipo.
- Disminución de la dificultad y el tiempo en la obtención de los datos.
- Aumento en la precisión de las lecturas.

Adicionalmente se busca también incrementar la facilidad en el ensamble y puesta en operación del sistema, así como lograr que el mantenimiento sea más sencillo y menos costoso en comparación con el sistema antecesor.

## **CAPITULO 3: PARTE MECÁNICA DEL SISTEMA.**

En este capítulo se tratarán de manera general las características mecánicas de las mesas rotatorias que funcionan como actuadores en el sistema, así como los aspectos generales del ensamble mecánico. Se tratará también de la importancia de la estabilidad, repetibilidad y precisión de esta parte, que son aspectos fundamentales que repercuten directamente en el desempeño de todo el sistema.

### **3.1 IMPORTANCIA DEL SISTEMA MECÁNICO.**

Inherente a cualquier técnica de monitoreo de deformación esta la suposición fundamental de que los cambios medidos verdaderamente reflejen el comportamiento del volcán y no variaciones causadas por efectos no volcánicos producidos por el dispositivo de medición. No importa cuán preciso o confiable sea el método de medición, los datos obtenidos son inútiles si no detectan respuestas verdaderas a presiones del subsuelo que actúan sobre el edificio volcánico.

Particularmente se pueden encontrar variaciones debidas a cargas estáticas, dinámicas, juego entre partes y por efectos térmicos en el sistema mecánico que de no ser mínimas afectan de manera importante el desempeño del sistema completo.

Adicionalmente la repetibilidad, precisión y sobre todo la sensibilidad de los actuadores del sistema, es decir específicamente de las mesas rotatorias encargadas de dar movimiento, es de vital importancia debido a que como ya se ha dicho<sup>29</sup> la divergencia del haz láser provoca la necesidad de tener desplazamiento muy pequeños en el lugar en donde se origina el haz que es justamente en el propio sistema de movimiento.

De esta manera se vuelven requisitos importantes una buena estabilidad en el sistema mecánico así como un diseño en el ensamble que minimice las variaciones debidas a cargas estáticas, dinámicas, juego y efectos térmicos y sobre todo una buena sensibilidad y poco balanceo por parte del sistema de movimiento.

---

<sup>29</sup> Ver sección 2.4 de la presente tesis.



### 3.2 ENSAMBLE MECÁNICO.

Para poder integrar los componentes mecánicos del sistema de movimiento se diseñó una estructura con el propósito de ensamblar las dos mesas rotatorias entre sí y con el distanciómetro.

El diseño completo de esta estructura así como la selección de materiales, el análisis correspondiente de las cargas y todos los planos para su fabricación se encuentran detallados como ya se ha mencionado en la tesis de maestría que tiene por nombre “Diseño de un sistema automatizado de segunda generación para el monitoreo continuo de deformaciones volcánicas”<sup>30</sup>.

El sistema de movimiento es capaz de girar al distanciómetro sobre dos ejes de rotación que se intersecan en un punto que resulta ser el centro óptico del distanciómetro (ver Fig. 3.1).

Por requisitos de estabilidad, rigidez y facilidad de ensamble se llegó a una configuración en donde una mesa rotatoria proporciona al EDM movimiento sobre un plano horizontal y la otra mesa movimiento sobre un plano vertical, siempre manteniendo sujeto el distanciómetro al ensamble en la mayor área posible, para lograr mantener el punto de emisión del láser en la misma posición y evitar desplazamientos del origen.

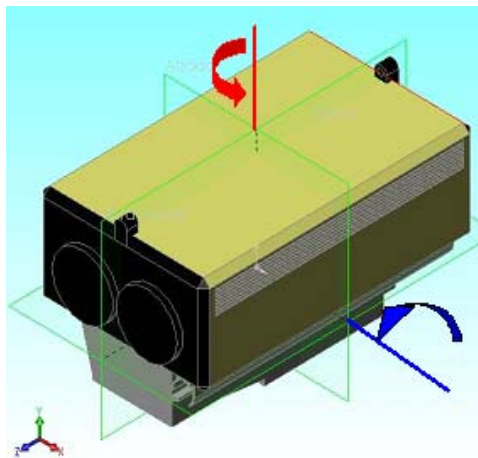


Fig. 3.1 Distanciómetro y ejes de rotación<sup>31</sup>.

<sup>30</sup> Errasti O.U., “Diseño de un sistema automatizado de segunda generación para el monitoreo continuo de deformaciones volcánicas”; Tesis de maestría Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2006.

<sup>31</sup> Modificado de Martínez, López, Is-Boset Kevin B., Programa de Servicio Social, Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F. 2006.

### 3.2.1 Configuración geométrica.

La mesa rotatoria para el movimiento vertical queda colocada a un costado del distanciómetro sujetándolo con una estructura de acero inoxidable en forma de "L", en la parte inferior de la mesa de movimiento vertical se encuentra ensamblada una estructura en forma de "C" que soporta a dicha mesa y la ensambla con la mesa horizontal con la ayuda de una placa.

Finalmente para soportar y fijar todo el ensamble anterior se diseñó y fabricó un soporte cuya finalidad es otorgar rigidez y estabilidad a todo el sistema mecánico fijándolo a un pilar firme que puede ser de concreto.

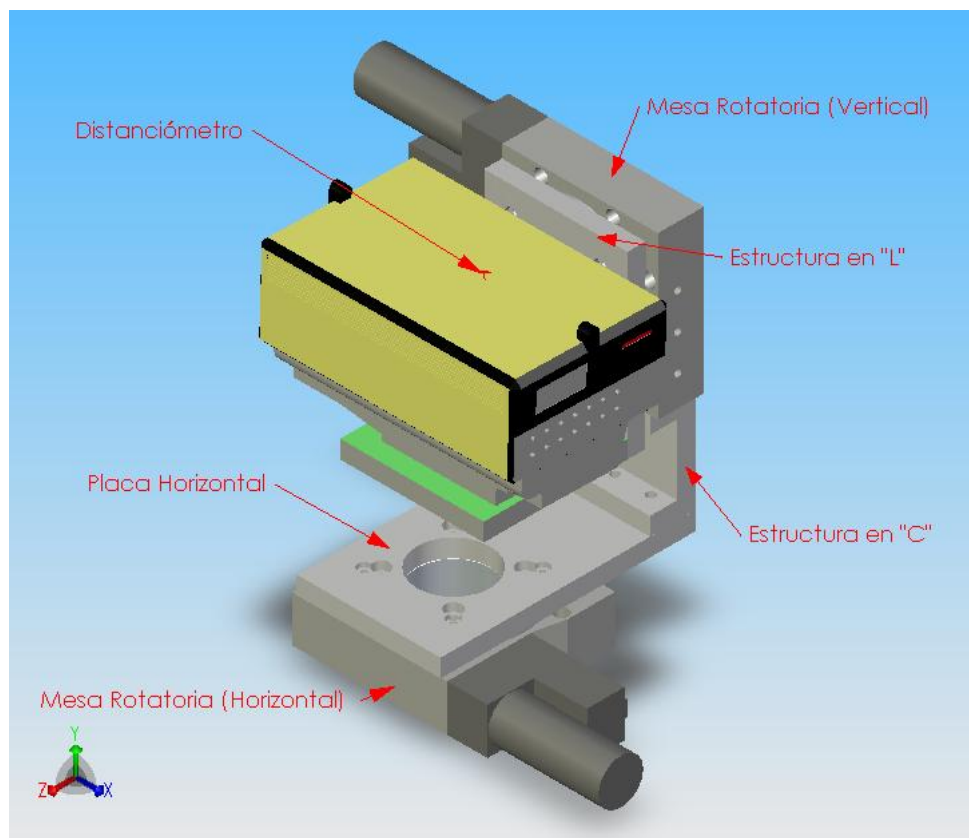


Fig. 3.2 Configuración geométrica del ensamble mecánico<sup>32</sup>.

<sup>32</sup> Martínez, López, Is-Boset Kevin B., Programa de Servicio Social, Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F. 2006.

### 3.3 SISTEMA DE MOVIMIENTO.

La configuración cinemática de este sistema está basada en la configuración del sistema antecesor<sup>33</sup>, es decir las ecuaciones cinemáticas de ambos sistemas resultan ser iguales debido a que la configuración del sistema así como los movimientos que realiza y los rangos de movimiento son idénticos.

Definiendo un sistema de referencia absoluto  $X,Y,Z$  y un sistema de referencia móvil o relativo  $x,y,z$  como los ilustrados en la figura 3.3, se puede notar que la mesa rotatoria vertical hace que el distanciómetro gire alrededor del eje  $y$ , mientras que la mesa horizontal hace girar a toda la estructura con respecto al eje  $Z$ , de acuerdo con esto puede decirse entonces que la velocidad del sistema es la que actúa en el eje  $Z$ , debido a que provoca movimiento tanto de la estructura como del distanciómetro al mismo tiempo, y por consecuencia la velocidad relativa es la que actúa en el eje  $y$ , debido a que solamente influye en el movimiento vertical del haz del distanciómetro.

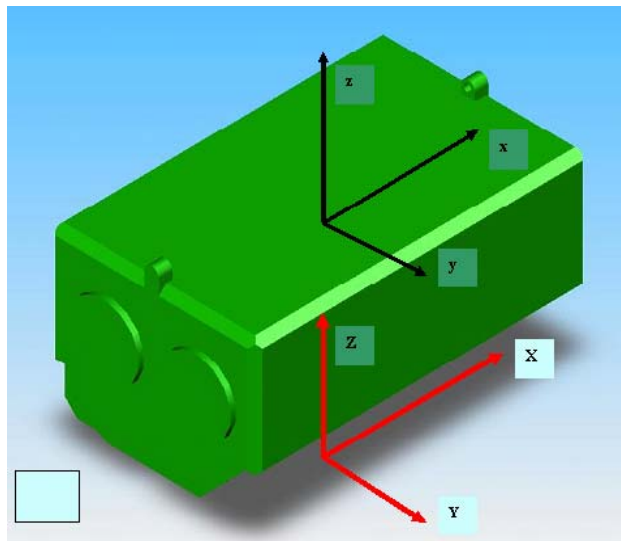


Fig. 3.3 Sistemas de referencia<sup>34</sup>.

Tomando en cuenta estas consideraciones así como condiciones iniciales de movimiento nulas, es posible seguir un procedimiento similar al detallado en la tesis que documenta el sistema anterior<sup>35</sup> para poder encontrar las ecuaciones cinemáticas que describen el comportamiento del actual sistema.

<sup>33</sup> y <sup>35</sup> Errasti O.U., Juárez G.J.A., Huerta R.M.A., "Diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real"; Tesis de licenciatura Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2000.

<sup>34</sup> Modificado de Martínez, López, Is-Boset Kevin B., Programa de Servicio Social, Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F. 2006.

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

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

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

Estas son las ecuaciones cinemáticas en forma paramétrica del sistema anterior, y son válidas para el nuevo sistema debido a que las configuraciones cinemáticas de ambos sistemas son idénticas como se indicó anteriormente. Estas relaciones describen la velocidad relativa y angular del sistema.

Basándose en las condiciones cinemáticas, se pueden determinar los momentos angulares que se presentan durante el desplazamiento y con ello determinar los torques necesarios para la selección de los motores. Sin embargo para este sistema dicha elección se basó principalmente en la precisión, ya que los requerimientos de carga de los motores seleccionados sobrepasan por mucho las necesidades del sistema.

A continuación se presenta un análisis en el que se muestra que las cargas que necesitan ser movidas, una en voladizo y otra de manera normal, por las mesas vertical y horizontal, respectivamente, no sobrepasan las especificaciones técnicas, de acuerdo con las características de carga que vienen detalladas en el manual de las mesas rotatorias<sup>36</sup>.

Para la mesa vertical es necesario realizar el análisis de carga en voladizo por lo que la fórmula que se utiliza es la que se encuentra en el Apéndice B en las especificaciones de carga de las mesas rotatorias.

$$Q \leq \frac{C_z}{\left(1 + \frac{D}{44}\right)} \text{ donde:}$$

$Q$  = carga máxima en voladizo [N]

$C_z$  = carga normal máxima = 250 [N]

$D$  = distancia de voladizo en [mm]

De acuerdo con la ecuación anterior, la carga  $Q$  que debe mover la mesa no debe ser mayor que la carga que resulte de realizar el cociente. Entonces para determinar el valor de  $Q$  se tiene que:

<sup>36</sup> NEWPORT, "Manual de Usuario M-495CC", Pág. 4

Q = peso del distanci6metro + peso de estructura en "L"

$$Q = 1.7 \text{ [kg]} + 0.719 \text{ [kg]} = 2.419 \text{ [kg]} = 23.7062 \text{ [N]}$$

El peso del distanci6metro fue tomado de sus hojas de especificaciones del Ap6ndice B y el de la estructura en "L" fue medido con una balanza granataria digital, resultando en 0.719 [kg]. La distancia de voladizo fue tomada con respecto a las caracter6sticas de la estructura como 57.5 [mm] y realizando las operaciones pertinentes se obtiene:

$$Q = 2.419 \text{ [kg]} = \mathbf{23.7062 \text{ [N]}}$$

$$\left( \frac{C_z}{1 + D/44} \right) = \frac{250}{1 + \frac{57.5}{44}} = \mathbf{108.42 \text{ [N]}}$$

Del an6lisis anterior se puede inferir claramente que la carga Q es apenas una peque1a fracci6n de la carga m6xima que puede soportar la mesa vertical en esa configuraci6n.

Para la mesa horizontal el an6lisis es distinto ya que esta mesa debe ser capaz de hacer rotar la estructura completa, es decir la carga que debe mover incluye los pesos de el distanci6metro, la mesa rotatoria vertical que fue tomado de la Tabla B-4, el peso de la estructura en "L", el peso de la estructura en "C" medido con la balanza granataria digital fue 0.393 [kg] y el de la placa horizontal que result6 ser de 0.538 [kg]. La suma de todos los pesos anteriores nos proporciona el valor de la carga total que debe mover la mesa horizontal.

La configuraci6n de esta carga puede ser tomada como si esta estuviera siendo ejercida de manera normal a la mesa horizontal, esto es debido a la posici6n del centro de masa de toda la estructura que si bien no se encuentra completamente en el centro geom6trico de la mesa, el error que se comete al considerarlo de esta manera es peque1o.

$$C_{z \text{ sistema}} = 1.7 \text{ [kg]} + 2 \text{ [kg]} + 0.719 \text{ [kg]} + 0.393 \text{ [kg]} + 0.538 \text{ [kg]} = 5.35 \text{ [kg]} = 52.43 \text{ [N]}$$

$$C_{z \text{ sistema}} = \mathbf{52.43 \text{ [N]}}$$

$$C_{z \text{ m6x.}} = \mathbf{250 \text{ [N]}}$$

En el análisis para la mesa horizontal aun con el error que se comete al considerar el centro de masa en el centro de la mesa, es posible notar que la carga normal máxima que soporta la mesa esta muy por encima de la carga total de la estructura completa por lo que se puede concluir que los torques necesarios para el sistema quedan por completo cubiertos con la selección de las mesas rotatorias M-495CC. En la siguiente sección se aborda de manera general las características técnicas de las mesas rotatorias así como una breve descripción de su función en el sistema.

### 3.4 DESCRIPCIÓN DE LAS MESAS ROTATORIAS M-495CC.

Las mesas rotatorias M-495CC son los dispositivos mecánicos encargados de dar movimiento al sistema para poder posicionar al EDM en la dirección correcta y realizar la medición. Por las características de su diseño resultan adecuadas para el funcionamiento y la precisión en el sistema.

Poseen un diseño con una rejilla altamente flexible para el montaje horizontal o vertical, una configuración mecánica de tornillo sinfín-engrane provista de una rueda autolubricadora y un cojinete de diámetro grande para reducir al mínimo el balanceo y el juego, un compensador de carga que reduce al mínimo el contragolpe, limitándolo a  $0.015^\circ$ .

Un encoder<sup>37</sup> óptico de precisión montado directamente lee la posición a una resolución de  $0.001^\circ$ . La lectura angular gruesa es proporcionada por una escala montada sobre las mesas rotatorias, graduada en grados. También incluye interruptores de límite y un interruptor de origen, los interruptores de límite se pueden inhabilitar para proporcionar una rotación de  $360^\circ$  continuos. Las mesas están equipadas con una perilla para control manual cuando la energía del motor está apagada. Y un cable de 3 [m] para la conexión a el driver ESP 300<sup>38</sup>. Las especificaciones completas de las mesas rotarias M-495CC están detalladas en el Apéndice B en el que también se incluyen una figura referente a sus especificaciones de carga.



Fig. 3.3 Mesas rotatorias M-495CC<sup>39</sup>.

<sup>37</sup> Encoder: transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de impulsos digitales.

<sup>38</sup> Sección 4.2.1 de la tesis.

<sup>39</sup> NEWPORT, "Manual de Usuario M-495CC", Pág. 1.

## CAPITULO 4: PARTE ELECTRÓNICA DEL SISTEMA.

El presente capítulo describe de manera general las funciones de los componentes electrónicos más importantes en el sistema, aborda algunas de las problemáticas más importantes que se enfrentaron en el desarrollo de la parte electrónica del sistema y explica las soluciones que se dieron a estos problemas.

Como ya se ha mencionado en el proceso de diseño del sistema los componentes mecánicos fueron diseñados, seleccionados y construidos aisladamente del controlador electrónico, como suele suceder en la mayoría de los sistemas mecatrónicos, es por esta razón que el controlador electrónico tuvo que ser entonces diseñado y de alguna manera “ajustado” para encajar con la parte mecánica y más que nada con los otros dispositivos electrónicos con los que ya se contaba al inicio del proyecto y que específicamente son el distanciómetro marca *LEICA DI3000* y el *Controller/Driver ESP 300* marca *NEWPORT*. Es importante para el lector conocer las características de estos componentes por lo que las 2 secciones posteriores estarán dedicadas a describir sus especificaciones y funcionamiento.

### 4.1 SOBRE EL ESP 300.

Ya se han tratado a detalle las características mecánicas de las mesas rotatorias *495 ACC* pero es importante mencionar que dichas características dependen principalmente del control que ofrece el *Controller/Driver ESP 300* sobre las mesas.

#### 4.1.1 ¿QUÉ ES EL CONTROLLER/DRIVER ESP 300?

El *ESP (Enhanced System Performance)*<sup>40</sup> o sistema de funcionamiento mejorado, en este caso el modelo 300, consiste de un controlador avanzado independiente, con drivers integrados. El *ESP 300* puede controlar hasta 3 ejes de movimiento en cualquier configuración, motores de DC o motores a pasos (ver Fig. 4.1).

En otras palabras el *ESP 300* proporciona y regula el voltaje y la corriente que necesitan las mesas rotatorias para moverse. También puede controlar de manera independiente la posición, velocidad, aceleración, perfiles de velocidad, y otros parámetros importantes de cada uno de los 3 motores que le pueden ser conectados. Para lograr esto cuenta con tres modos de funcionamiento:

Modo local - que consiste en una operación independiente, ejecutando el movimiento que le es indicado a través del panel delantero.

---

<sup>40</sup> NEWPORT, “Manual de Usuario ESP300 Motion Controller/Driver”, Pág. 20.





## 4.2 SOBRE EL DISTANCIOMETRO LEICA DI3000.

El distanciómetro *DI3000* es un dispositivo electrónico para medición de distancias, que funciona emitiendo un láser infrarrojo, que se refleja en un prisma o en su defecto sobre una superficie, y dependiendo del tiempo que tarda el haz en recorrer la distancia y regresar a su punto de origen, es como se determina ésta (ver Fig. 4.2 y Fig. 4.3).

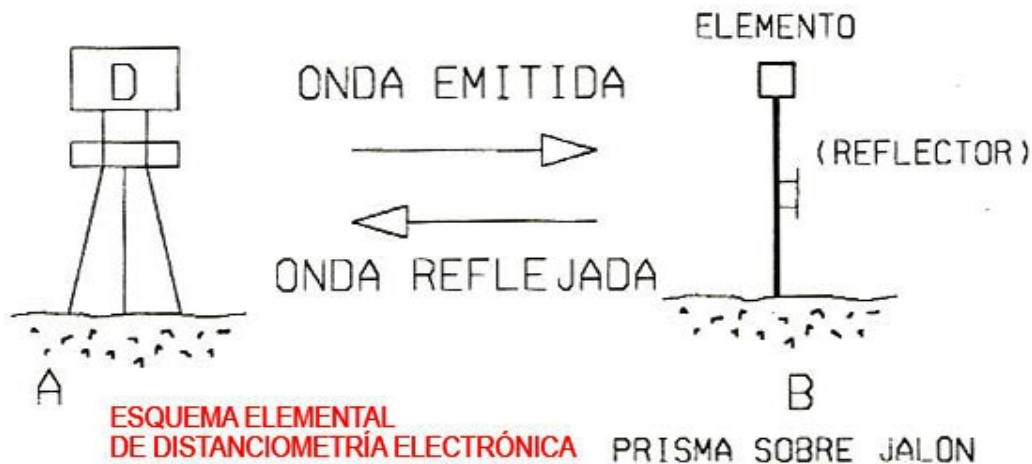


Fig. 4.2 Esquema distanciómetro-prisma<sup>43</sup>.

En esencia el distanciómetro solo puede medir la distancia inclinada, para medir la distancia horizontal y desnivel, se debe introducir el ángulo vertical y por senos y cósenos calcula las otras distancias, también poseen un puerto en la parte inferior para recibir la información directamente de un teodolito electrónico. Dicho puerto es de vital importancia para el desarrollo del proyecto ya que a través de él podremos controlar al distanciómetro.



Figura 4.3 Distanciómetro *LEICA DI3000*<sup>44</sup>.

<sup>43</sup> Piña Paton Benjamín, "Evolución en la captura y el tratamiento de la información geográfica con fines cartográficos", Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. MAPPINGINTERACTIVO, Julio de 1999, Cáp. 4.2.1 "Evaluación de las distancias".

<sup>44</sup> Disponible en [www.rost.co.at/rn/daten/prospekte/rovi/Prospekt\\_DI3000\\_DIOR3002.pdf](http://www.rost.co.at/rn/daten/prospekte/rovi/Prospekt_DI3000_DIOR3002.pdf)

### 4.2.1 PRINCIPIO FÍSICO.

Casi todos los distanciómetros funcionan por el método de la comparación de fase de las ondas emitida y reflejada, consiste en la salida de una onda portadora desde un foco emisor que tras reflejarse en el prisma, regresa al origen. La portadora es tratada con una onda moduladora, recorriendo el doble de la distancia que se pretende evaluar.

La onda portadora tiene la misión de configurar el enlace entre el foco emisor y el prisma, en este caso se emplea un haz de luz en la región del infrarrojo.

La onda moduladora es la autentica onda que ejecuta la medición; la forma de enviar esta onda moduladora de medición es modulando la portadora. Los sistemas de modulación utilizados usualmente son; en frecuencia, en amplitud, pulsante y por giro del plano de polarización (ver Fig. 4.4).

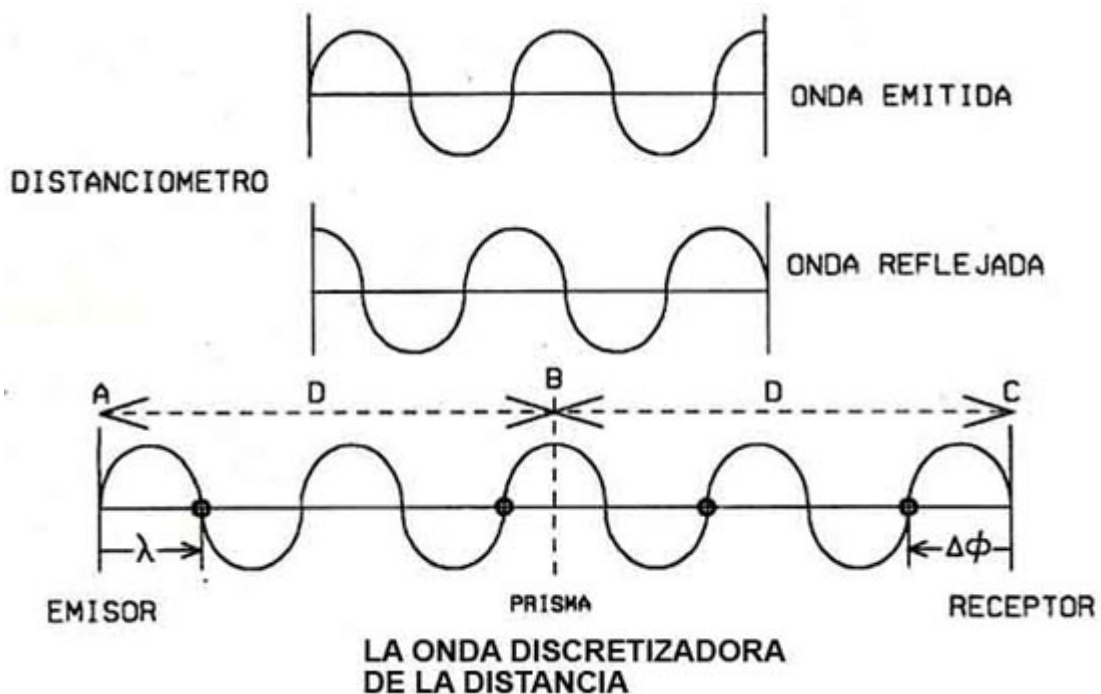


Fig. 4.4 Principio de funcionamiento del *LEICA DI3000*<sup>45</sup>.

<sup>45</sup> Piña Paton Benjamín, "Evolución en la captura y el tratamiento de la información geográfica con fines cartográficos", Revista Internacional de Ciencias de la Tierra MAPPINGINTERACTIVO, Julio de 1999, Cáp. 4.2.1 "Evaluación de las distancias"

La modulación en amplitud, utilizada muy frecuentemente en los distanciómetros de las estaciones totales, consiste en hacer proporcional la amplitud de la portadora y la onda moduladora. Considerando un sistema referencial, las ondas tienen un movimiento oscilatorio definido por la ecuación:

$$X = a \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \dots (1)$$

Suponiendo la emisión de una onda de longitud  $\lambda$  en el instante  $t_0$  desde un punto  $A$  hacia otro  $B$ , desde el cual el reflector devuelve la señal, la distancia que se pretende evaluar es  $AB=D$ . El espacio recorrido por la onda es  $2D$  equivalente a considerar la continuación de la onda hasta  $C$ .

Con este planteamiento, siempre habrá un número entero de longitudes de onda de fácil determinación y la posibilidad de evaluar la diferencia de fase entre la onda emitida y la reflejada (ver Fig. 4.4).

Así que finalmente el distanciómetro posee la electrónica necesaria para generar la onda emitida hacia el prisma, un arreglo óptico para dirigirla hacia un punto determinado, un oscilador interno a una frecuencia muy alta y además constante, que determina el tiempo de vuelo de la onda para calcular de manera aproximada la distancia, y adicionalmente posee un comparador de fase para determinar la diferencia en fase entre la onda emitida y la reflejada por el prisma y con esto poder medir de manera mas precisa la distancia.

#### 4.2.2 CONTROL REMOTO DEL DI3000.

Para controlar vía remota al distanciómetro solo es posible hacerlo a través del puerto con el que se conecta al teodolito electrónico. Este puerto transmite y recibe datos a través de una comunicación serial que tiene implementado el protocolo *RS232* y los datos recibidos y transmitidos están en código *ASCII*

Los distanciómetros *LEICA DI3000* solo se produjeron durante los años 1990 a 1993<sup>46</sup> posteriormente los fabricantes han diseñado nuevos modelos, pero son para propósitos diferentes del monitoreo volcánico y por lo general son de menor alcance y mayor costo al estar disponibles sólo como estaciones totales.

A continuación en la tabla 4.1 se muestran los comandos en código *ASCII* que deben ser transmitidos para poder controlar al distanciómetro a través del único puerto con el que cuenta. Es importante mencionar que estos comandos se obtuvieron en base a prueba y error y por lo tanto no es posible asegurar que sean los únicos que el distanciómetro posea, sin embargo los comandos encontrados cumplen de manera suficiente para las funciones que debe realizar el *DI3000* en el sistema.

Comandos en código *ASCII* para la interfaz con la PC (todos los caracteres en mayúsculas):

Tabla 4.1 Caracteres *ASCII* para *DI 3000*<sup>47</sup>.

Carácter ASCII	Descripción
I	Medición única rápida, ingresa al modo DIL
A	Reservado en el diseño para encendido
D	Nivel de batería e intensidad de señal
F	Encendido y apagado de luz necesario modo DIL
H	Única medición, ingresa al modo DIL
J	Medición de repetición, ingresa al modo DIL
K	Medición de seguimiento, necesario modo DIL
L	Sale del modo DIL
N	Apagado
M	Detiene cualquier tipo de medición

Nota: cualquier carácter recibido enciende el distanciómetro

---

<sup>46</sup> [http://www.wild-heerbrugg.com/distance\\_meters.htm](http://www.wild-heerbrugg.com/distance_meters.htm)

<sup>47</sup> Los autores.

### 4.3 GENERALIDADES SOBRE COMUNICACIÓN SERIAL Y RS-232.

En las secciones anteriores se han tratado a detalle las especificaciones técnicas, así como el funcionamiento de los componentes electrónicos con los que el proyecto contaba en su fase inicial. En estas secciones se hizo énfasis en los tipos de comunicación o control vía remota de los que disponen estos componentes, destacándose que ambos comparten un protocolo de comunicación serial que es el RS-232. Con base a esta situación y adelantando un poco sobre el desarrollo del control electrónico se decidió incluir esta sección, que de manera general aborda la comunicación serial y la norma RS-232.

#### 4.3.1 COMUNICACIÓN SERIAL.

Los datos lógicos en las computadoras y en los microcontroladores, como en este caso, están representados por bits (*binary digits*). El bit es una construcción intelectual, representada en el microcontrolador o computadora por un voltaje determinado. Cuando los bits deben enviarse dentro de la propia computadora o hacia el exterior, se transmiten a través de cables como cualquier señal de voltaje.<sup>48</sup>

Los bits se agrupan en unidades determinadas que proporcionan un esquema lógico de mayor complejidad. Por ejemplo, un byte (octeto) está formado por una serie de ocho bits. Estos ocho bits pueden ser unos o ceros indistintamente, son  $2^8 = 256$  combinaciones posibles. Estas combinaciones permiten definir con cada byte un número entre 0 y 255.

La transmisión de varios *bits* simultáneamente por igual número de cables (más uno de referencia) se denomina transmisión en paralelo. Éste es un tipo de transmisión suele ser rápida, pero sujeta a errores provocados por las diferencias de resistencia, capacidad e inductancia que pueden existir durante el trayecto que recorre la señal a través de los conductores.<sup>49</sup>

Para que la transferencia de datos sea menos cara y menos sujeta a errores es necesario otro método de comunicación. La alternativa a enviar los datos simultáneamente, es enviarlos secuencialmente, uno después de otro. En el extremo receptor se invierte el proceso y se reconstruye el octeto original. De este modo los datos pueden transmitirse simplemente con dos cables. Este esquema es conocido como transmisión en serie.

---

<sup>48</sup> Campbell J., "El libro del RS-232" 2ª Edición Madrid, España -Anaya Multimedia.

<sup>49</sup> Uylless Black, "Redes de Computadores Protocolos Normas e Interfaces", 2ª Edición, México, Editorial Computec Ra-Ma Alfaomega.

La transmisión en serie reduce la complejidad, pero obteniendo a cambio una menor eficacia: es necesario un intervalo de tiempo ocho veces mayor para transmitir ocho bits individuales que para transmitirlos simultáneamente. El tiempo necesario para la transmisión de un byte es realmente mayor que el correspondiente a la transmisión de ocho bits individuales. Deben añadirse otros bits suplementarios. El conjunto de bits completo a enviar puede ser el siguiente:

### **Bit de inicio, Bits de datos (7/8), Bit de paridad.**

El *bit* de paridad se utiliza para comprobar si los *bits* de datos han sido bien recibidos. Existen estas variantes:

Paridad par. Si la suma de los *bits* de datos es par, el *bit* de paridad es 1, si es impar, el *bit* de paridad es 0.

Paridad impar. Si la suma de los *bits* de datos es impar, el *bit* de paridad es 1, si es par, el *bit* de paridad es 0.

Sin paridad. No se utiliza el *bit* de paridad.

*Bit* de paro. Pueden ser uno o dos *bits*.

Por lo tanto, será necesario enviar un mínimo de 10 *bits* por cada byte. Esto provocará una disminución de velocidad respecto a la transmisión en paralelo, pero es aceptable para los dispositivos externos usualmente utilizados. La menor velocidad es compensada por el incremento de seguridad y alcance de la señal.

Para la comunicación de datos en serie se han establecido diferentes normas que especifican las características técnicas de la conexión. En el sistema solo se ha utilizado un solo tipo de comunicación serial. Es por esta razón que se pensó conveniente incluir algunas de las características más importantes de esta norma.

### **4.3.2 RS232 (RS-232-C, RS-232 )**

En 1969 la EIA (Asociación de Industrias Electrónicas), conjuntamente con los Laboratorios *Bell* y los fabricantes de equipos de comunicaciones, formularon el EIA RS-232-C. El propósito inicial fue la conexión entre un Equipo Terminal de Datos (*DTE, Data Terminal Equipment*) y un Equipo de Comunicación de Datos (*DCE, Data Communications Equipment*), empleando un intercambio de datos binarios en serie.<sup>50</sup>

---

<sup>50</sup> Uyles Black, "Redes de Computadores Protocolos Normas e Interfaces", 2ª Edición, México, Editorial Computec Ra-Ma Alfaomega.

Actualmente, la conexión *RS232* es el medio principal mediante el cual se pueden conectar equipos auxiliares a las computadoras personales, a pesar de que este modelo fue proyectado para resolver únicamente el problema de conexión entre módems (*DCE*) y computadoras (*DTE*). La mayoría de las dificultades con este modelo provienen de su utilización para tareas diferentes para las que fue diseñado.

El documento que establecía el estándar constaba de cuatro secciones:

- Características de la señal eléctrica. Definición de los voltajes que representan los ceros y unos lógicos.
- Características mecánicas de la conexión. Establece que el *DTE* dispondrá de un conector macho y el *DCE* un conector hembra. También se especifican la asignación de números a las patillas. El tipo y las medidas del conector son establecidas por la Organización Internacional de Estándares (*ISO*). Los más utilizados son los de 9 pines (*DB-9*) y los de 25 (*DB-25*).
- Descripción funcional de los circuitos de intercambio. En esta sección del documento se define y da nombre a las señales que se utilizarán.
- Interfaces para configuraciones seleccionadas de sistemas de comunicación.

Los tres circuitos principales utilizados para la comunicación son los siguientes:

- Línea 2 (*TXD*). Salida de datos del *DTE*.
- Línea 3 (*RXD*). Entrada de datos al *DTE*.
- Línea 5 (común). Circuito común, referencia para determinar la polaridad y voltaje de las otras líneas.

El término salida se refiere a la transferencia de datos desde una computadora o microcontrolador a un dispositivo externo. Recíprocamente, la transferencia de datos desde un dispositivo externo a la computadora se conoce como entrada. Estos procesos reciben el nombre genérico de entrada/salida (E/S).

Hay que considerar el sentido físico correspondiente a los conceptos de entrada y salida. La salida de datos se realiza cambiando la diferencia de potencial entre la línea 2 y la 5. Si disponemos de dos cables conectados respectivamente a las patillas 2 y 5 del conector, esta diferencia de potencial se transmitirá a largo de ellos, ya que se trata de materiales conductores. La entrada de datos corresponde al proceso inverso, generación por una fuente externa de una serie de diferencias de potencial y detección de dichas diferencias entre las patillas 3 y 5 del conector.

Los voltajes correspondientes a los niveles lógicos existentes en la conexión RS232 se esquematizan en la figura 4.5.

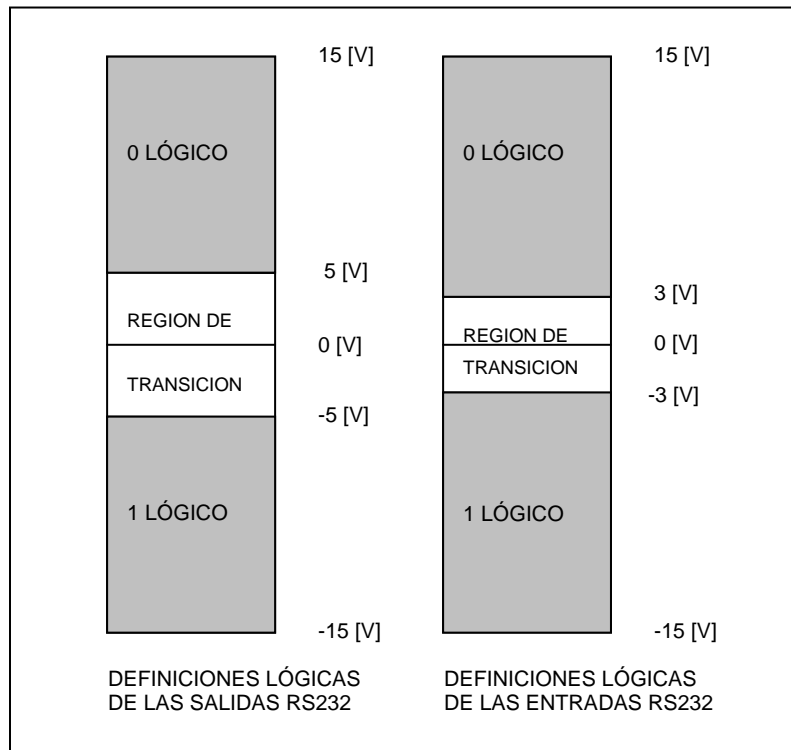


Fig. 4.5 Definición de los voltajes que representan los niveles lógicos en el RS-232<sup>51</sup>.

Como puede observarse, la conexión RS-232 no opera con la misma fuente de alimentación de 5 [V] de otros circuitos electrónicos integrados. Sus voltajes pueden oscilar entre +15 y -15 [V]. Además, los datos son transmitidos al contrario de las convenciones lógicas de uso corriente: un voltaje positivo en la conexión representa un 0, mientras que un voltaje negativo representa un 1.

La única diferencia entre la definición de salida y de entrada es el ancho de la región de transición, de -3 a +3 [V] en la entrada y de -5 a +5 [V] en la salida. Esta diferencia entre las definiciones de voltajes mínimos permisibles se conoce como el margen de ruidos del circuito. Este margen de seguridad es de gran utilidad cuando los cables deben pasar por zonas cercanas a elementos que generan interferencias eléctricas: motores, transformadores, reguladores, equipos de comunicación. Estos elementos, unidos a la longitud del cable pueden hacer disminuir la señal hasta en [V], sin que se afecte adversamente al nivel lógico de la entrada.<sup>52</sup>

<sup>51</sup> Los autores.

<sup>52</sup> Campbell J., "El libro del RS-232" 2ª Edición Madrid, España -Anaya Multimedia.



Si se aumenta la velocidad de transmisión, las señales de datos se vuelven susceptibles a pérdidas de voltaje causadas por la capacidad, resistencia e inductancia del cable. Estas pérdidas son conocidas como efectos de alta frecuencia, y aumentan con la longitud del cable. El ancho de la zona de transición ( $-3[V]$  a  $+3[V]$  en la entrada) determina el margen de ruidos, que limita directamente la velocidad máxima a la que se pueden transmitir datos sin degradación. Entre dos equipos *RS-232* esta velocidad es de 19200 [baudios] (bits por segundo), para longitudes de cable inferiores a 15 [m], pero disminuyendo la velocidad pueden utilizarse longitudes mayores de cable.

Puede ser necesario que el sistema que transmite datos necesite conocer el estado del sistema que los recibe, es decir si puede recibir datos o no. Para este propósito existe el control interactivo de dispositivos, conocido también como acoplamiento (*handshaking*). El acoplamiento es el modo en que se regula y controla el flujo de datos a través de la conexión.

El acoplamiento por software existe cuando un dispositivo controla al otro por medio del contenido de los datos. Por ejemplo, si debemos mandar información a otro elemento podemos incluir caracteres de control al inicio y final de la comunicación, para indicar la longitud del mensaje y una verificación de todo el conjunto de datos enviados.

Con el acoplamiento por hardware se trabaja a un nivel electrónico más fundamental. Un dispositivo puede regular el flujo de datos simplemente cambiando el voltaje en un cable. La incorporación de este acoplamiento hace necesaria la adición de un hilo para transportar la señal.

Teniendo en cuenta que para cada señal transmitida puede ser necesario un mínimo de un acoplamiento, y que los dispositivos pueden transmitir y recibir, podemos observar que serán necesarios más de los tres circuitos básicos antes mencionados (común, entrada y salida).

Los nombres dados en el modelo oficial *RS-232* para las señales de datos y acoplamiento, así como su asignación a las diferentes patillas (pines) del conector, aparecen en la tabla siguiente.

Tabla 4.2 Nombre para las señales de datos y asignación de pines en el RS232<sup>53</sup>.

PIN DB 25	Pin DB 9	Nombre	Función
2	3	TXD	TRANSMISIÓN DE DATOS (SALIDA)
3	2	RXD	RECEPCIÓN DE DATOS (ENTRADA)
4	7	RTS	PETICIÓN DE ENVÍO (SALIDA)
5	8	CTS	DISPUESTO PARA ENVIAR (ENTRADA)
6	6	DSR	DISPOSITIVO DE DATOS LISTO (ENTRADA)
7	5	COMÚN	COMÚN (REFERENCIA)
8	1	DCD	DETECCIÓN DE PORTADORA DE DATOS (ENTRADA)
20	4	DTR	TERMINAL DE DATOS LISTO (SALIDA)
22	9	RI	INDICADOR DE LLAMADA (ENTRADA)

Podemos observar que pueden llegar a ser necesarios un total de nueve cables:

- 1 para enviar datos (*TXD*).
- 1 para recibir datos (*RXD*).
- 1 común a todos los circuitos.
- 4 señales de acoplamiento para poder enviar datos (*CTS*, *DSR*, *DCD*, *RI*).
- 2 señales de acoplamiento para poder recibir datos (*RTS*, *DTR*).

Algunas de las señales (*DCD*, *RI*) provienen de características necesarias para poder detectar el estado de un módem, pero no suelen ser necesarias para aplicaciones normales. Por ejemplo, para conectar dos computadoras personales con señales de acoplamiento, sería necesario efectuar las conexiones descritas en la figura 4.6 En estos esquemas, la dirección de las flechas indica realmente el sentido en que se mueve la información, es decir, el emisor y el receptor de la señal.

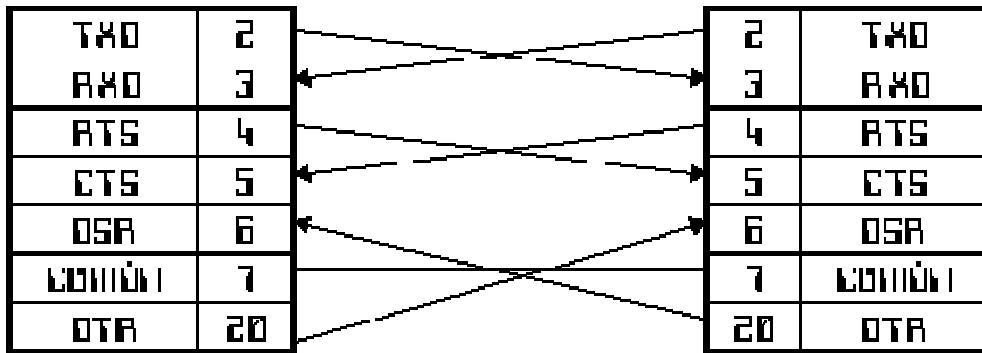


Fig. 4.6 Conexión estándar entre dos equipos RS-232<sup>54</sup>.

<sup>53</sup> Uyles Black, "Redes de Computadores Protocolos Normas e Interfaces", 2ª Edición, México, Editorial Computec Ra-Ma Alfaomega, APENDICE C.

<sup>54</sup> Los autores.

En el caso de no desear utilizar estas señales de acoplamiento, puede optarse por proporcionarlas por un medio físico, pues algunos programas de comunicación pueden requerir su presencia. Un posible esquema para esta conexión, puede ser el indicado en la figura 4.7. Se trata de un esquema más sencillo, pero puede funcionar en una gran parte de equipos, siempre que no se desee trabajar al límite de la capacidad de los dispositivos.

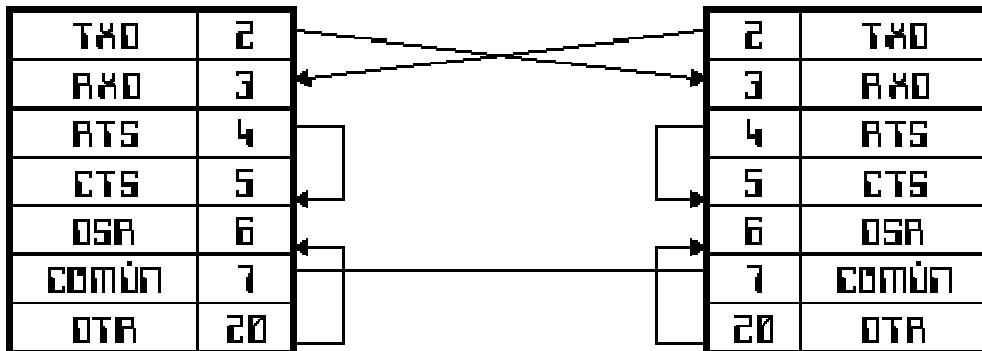


Fig. 4.7 Conexión entre dos equipos *RS-232* sin utilizar acoplamientos.<sup>55</sup>

Con lo expuesto hasta el momento es posible realizar la conexión física entre la mayor parte de dispositivos *RS-232*, aunque en ocasiones existen algunas excepciones y particularidades que impiden la correcta conexión. En estos casos es necesario un estudio detallado de las características de los dos dispositivos, para encontrar una solución particular a los problemas encontrados.

Es conveniente remarcar que la comunicación *RS-232* fue originalmente diseñada para establecer una comunicación punto a punto, es decir, entre dos únicos elementos. Al ser solamente dos elementos era posible efectuar los acoplamientos necesarios.

<sup>55</sup> Los autores.

## 4.4 RADIO MÓDEMS.

### ¿QUE ES UN MÓDEM?

Módem (palabra que es un acrónimo de modulador-demodulador), es un equipo electrónico capaz de transmitir y recibir información en forma digital a distancia, mediante la modulación y demodulación (en amplitud, frecuencia, fase o algún otro sistema) de la señal digital.

La parte moduladora del módem emite una señal analógica a la que se le denomina portadora. Generalmente, se trata de una simple señal senoidal. Los bits de información digital modifican alguna característica de la señal portadora, de manera que el receptor "sabe" si se está transmitiendo un "cero" o un "uno" lógicos. Las características que se pueden modificar de la señal portadora son:

- Amplitud, dando lugar a una modulación de amplitud (AM/ASK).

También es posible una combinación de modulaciones o modulaciones más complejas como la modulación de amplitud en cuadratura.

- Frecuencia, dando lugar a una modulación de frecuencia (FM/FSK).
- Fase, dando lugar a una modulación de fase (PM/PSK).

La parte demoduladora del módem interpreta los cambios en la señal portadora para reconstruir el flujo de bits enviados y con ello la información que esta recibiendo.

### JUSTIFICACIÓN DE LOS RADIO MÓDEMS.

Ya se ha hablado de la necesidad de transmitir los datos obtenidos por el sistema desde el lugar de la instalación al centro de monitoreo<sup>56</sup>. Debido a que una comunicación por cable resultaría demasiado costosa y poco practica, se incluyó en el diseño del sistema la utilización de los radio módems RF 115 de Black Box, que son los encargados de transmitir y recibir información y convertirla en señales de radio para poder lograr la comunicación a distancia entre el dispositivo remoto de medición y el centro de vigilancia y monitoreo donde se analiza e interpreta la señal. La elección de este tipo de módems fue tomando como principal justificación su relativamente fácil implementación y un costo accesible.

---

<sup>56</sup> ver Sección 2.4 de la presente tesis.

Adicionalmente algunas de las características importantes para el proyecto que poseen este tipo de módems son las siguientes:

- La transmisión de datos es segura gracias a su sistema de comunicación de espectro disperso.
- Inmunidad al ruido e interferencias de radio y electromagnéticas causadas por los motores.
- Funcionamiento en temperaturas extremas.

En sistemas anteriores, el enlace por radio representaba un problema debido a la saturación de frecuencias y la restricción de frecuencias reservadas oficialmente, algunos de estos sistemas requerían frecuencias fijas autorizadas para poder funcionar correctamente, con la tecnología “*Espectro Disperso*” (*Spread Spectrum*) que incorporan los radio módems, el enlace esta variando continuamente en forma pseudo aleatoria la frecuencia, buscando aquellas que están libres y que solo ocupa durante una breve fracción de segundo. De este modo el sistema no produce ni sufre interferencias.

### **SOBRE EL “INDUSTRIAL MÓDEM RF115” DE BLACK BOX.**

El módem industrial RF115 (numero de parte MDR100A-R4) es un módem inalámbrico de alto rendimiento diseñado para transmisiones de datos industriales en frecuencias de 902 a 928 [MHz] en las que no se requiere licencia. Utiliza una avanzada tecnología de “*Espectro Disperso*” para obtener una operación más confiable y resistente al ruido e interferencias. El módem funciona en diversos modos para satisfacer una amplia gama de los requisitos de comunicación (ver Fig. 4.8).

El módem puede funcionar en prácticamente cualquier ambiente y donde se utilicen comunicaciones de datos normales RS-232.

Un par de estos módems pueden funcionar como una conexión directa null-modem de 9 pines entre dos instrumentos a los cuales estén conectados.

En ciertas circunstancias, como es el caso de este proyecto se requiere ampliar el rango del módem usando una antena externa en lugar de la antena estándar tipo “whip”. Para ello el módem esta equipado de una conexión externa que permite el uso de una antena tipo “Yagi” direccional o de una antena omnidireccional. Al usar una antena externa, la antena tipo “whip” debe ser quitada. El uso de una antena externa puede mejorar radicalmente los resultados obtenidos con los módems RF115, pero para ello es necesario obtener una línea visión directa entre las antenas, y cambios en altura de las antenas no mayores a 60 [cm]de distancia.

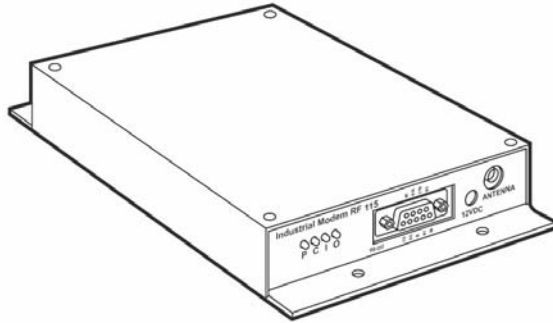


Fig.4.8 Radio modem Industrial Modem RF 115 Black Box Corporation<sup>57</sup>.

## 4.5 DESARROLLO DE LA TARJETA ELECTRÓNICA.

Ya se ha mencionado que un factor importante para el diseño del control electrónico es la necesidad de establecer una comunicación con el driver y el distanciómetro, para poder controlarlos de manera remota y sin hacer uso de una PC, en el lugar de la instalación del sistema de medición, también se indicó que en el caso del distanciómetro la única manera de lograr una comunicación es a través del protocolo *RS232*. El driver por su parte también cuenta con este tipo de comunicación.

Anexo a lo anterior, los radio módems, que son los encargados de lograr la transferencia de datos e instrucciones entre el sistema y la PC que sirve como interfaz hacia el usuario, se comunican también de manera serial y contemplan el mismo protocolo que el driver y el distanciómetro.

Por estas razones fue indispensable desarrollar una tarjeta electrónica que fuera capaz de comunicarse a través del protocolo *RS232* con los tres dispositivos. Para lograr esto surgió la idea por parte de los autores de utilizar como base del diseño de la tarjeta a un microcontrolador *PIC* de *Microchip*.

### 4.5.1 EL PIC.

Un **controlador** es un dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace algunas décadas se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta; posteriormente se emplearon los microprocesadores, que se rodeaban con chips de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso.

---

<sup>57</sup> Black Box Corporation, "Manual de usuario Industrial Modem RF115", Pág. 1.

En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de **microcontrolador**. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón de un circuito integrado.<sup>58</sup>

Los microcontroladores *PIC* de *Microchip* ofrecen ventajas que otros microcontroladores de otras marcas no ofrecen, principalmente un bajo precio, facilidad de programación, la abundante información que existe sobre ellos, y las variadas aplicaciones y herramientas de desarrollo que poseen determinaron la elección de este componente.

Durante el proyecto se contó con las siguientes herramientas de desarrollo para el PIC:

- Una tarjeta de demostración y desarrollo modelo *PIC DEM -2-PLUS*.
- Un programador/debugger ICD2 (*In Circuit Debugger*)<sup>59</sup> para programar al chip.
- El software MPLAB para el desarrollo de los programas dentro del PIC.
- Un compilador de lenguaje C para PIC's de la compañía CCS (Custom Computer Service, Inc.)<sup>60</sup>.

Entre los mencionados PIC existen diferentes gamas y familias, la elección del modelo que se utilizó para el desarrollo de la tarjeta fue determinada en gran medida por la facilidad para adquirirlo, el precio del componente, los módulos incluidos en el chip, y sobre todo por la capacidad para soportar el compilador de lenguaje C y las librerías incluidas en este, ya que estas librerías como se mencionara mas ampliamente en el Cáp. 5 son una pieza muy importante para el funcionamiento tanto del sistema como de la tarjeta electrónica y el control propiamente. En base a lo anterior finalmente se eligió el modelo *PIC16F877A*

Para que el PIC funcione de manera correcta es necesario incluir ciertos circuitos electrónicos que entre sus funciones básicas están proporcionar y regular el voltaje y corriente necesarios para el microcontrolador, así como generar los pulsos de reloj que sirven para que realice sus operaciones internas, estos circuitos se encuentran completamente detallados en las hojas de especificaciones del *PIC16F877*, pero se puede hacer una rápida referencia de ellos consultando el APENDICE A.

---

<sup>58</sup> Martín Cuenca Eugenio, Angulo Usategi José María, Angulo Martínez Ignacio.

"Microcontroladores PIC la solución en un chip", Editorial Paraninfo, México 1998, Pág. 5.

<sup>59</sup>Página oficial de la compañía Microchip <http://www.microchip.com>

<sup>60</sup>Página oficial de la compañía CCS <http://www.ccsinfo.com/>

#### 4.5.2 El Circuito Integrado MAX-232.

Como se mencionó en la sección 4.4.2 las señales del protocolo RS-232 no son señales TTL es decir señales que varían entre 0 y 5 [V] para representar los estados lógicos, como las que manejan la mayoría de los circuitos integrados que se utilizan en esta tarjeta, incluyendo específicamente al PIC que es el encargado de generar estas señales. Debido a esto es necesario realizar una conversión de voltaje, que haga compatibles estas señales con los dispositivos con los que se requiere comunicarse. Para ello se ha utilizado el circuito integrado MAX-232 fabricado por la casa MAXIM.

Este circuito soluciona los problemas de niveles de voltaje cuando se requiere enviar señales digitales sobre una línea RS-232. Este chip se utiliza generalmente en aquellas aplicaciones donde no se dispone de fuentes dobles de +12 y -12 [V]. El MAX-232 necesita solamente una fuente de +5V para su operación. Internamente tiene un elevador de voltaje que convierte el voltaje de +5V al de doble polaridad de +12V y -12V. Cabe mencionar que existen una gran variedad de circuitos integrados que cumplen con la norma RS-232 como son: MAX-220, DS14C232, MAX-233, LT1180A.

Los MAX-232 están diseñados para las comunicaciones RS-232 en ambientes adversos. Cada salida del transmisor y entrada del receptor se protege contra descargas de choques electrostáticos de  $\pm 15$  [kV] ESD (*Electro Static Discharge*). En estos circuitos las transmisiones de datos pueden llegar hasta 120 [kbps], cuando están montados de acuerdo con las especificaciones.<sup>61</sup>

Para que el circuito funcione correctamente debemos poner unos capacitores externos y alimentarlo correctamente, en la figura A-3 del APENDICE A se muestra la configuración de los pines del MAX-232, un diagrama interno y las conexiones necesarias así como los valores de los capacitores y la alimentación para el circuito, en una operación típica para interfases RS-232.

---

<sup>61</sup> Hoja de especificaciones MAX232 Pág. 1.



### 4.5.3 FUNCIONES DE LA TARJETA ELECTRONICA.

Ya se han tratado las características de los componentes más importantes de la tarjeta electrónica. Estos componentes juegan un papel importante en el desarrollo de las funciones que debe realizar la tarjeta, y en las cuales se basa su diseño. El diagrama de bloques de la figura 4.8 muestra de manera general la interacción de la tarjeta con los demás dispositivos del sistema.

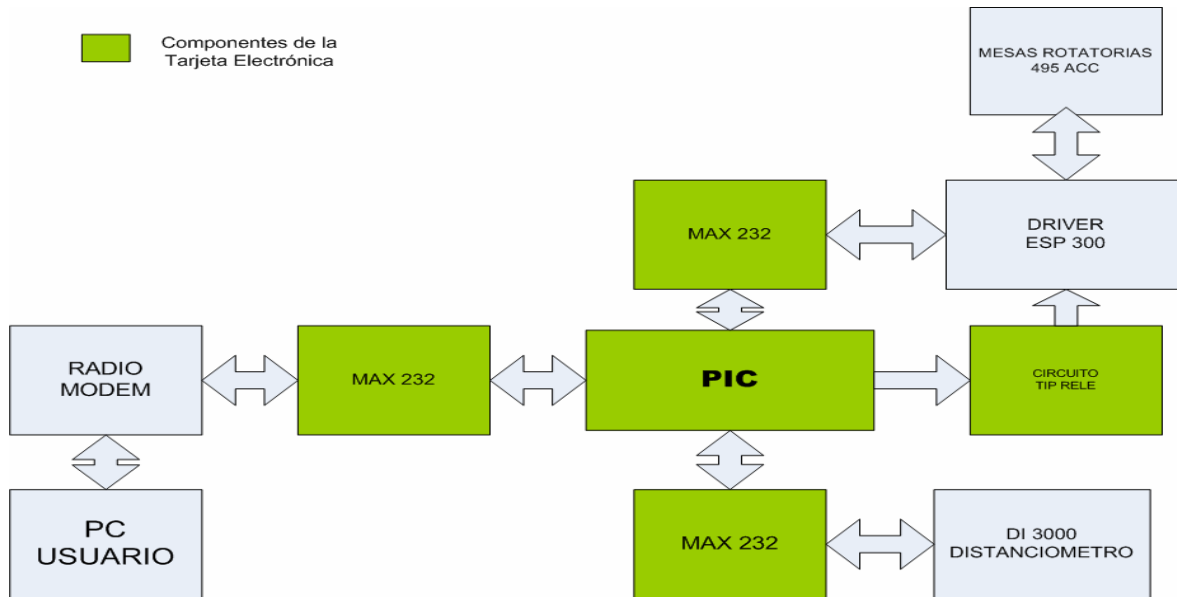


Fig. 4.9 Interacción de la Tarjeta con los otros dispositivos<sup>62</sup>.

La función principal de la tarjeta es la de transmitir y recibir datos con los otros tres componentes electrónicos (DI 3000, ESP 300 y PC o radio módem). Para lograr esto debe ser capaz de:

- Contar con tres puertos seriales independientes (uno para cada dispositivo).
- Generar las señales a los parámetros adecuados para cada dispositivo (*baudrate*, número de bits y paridad)
- Acoplar las señales de cada uno de los puertos a los niveles indicados por el protocolo RS-232

Adicionalmente, debido a que el ESP300 no cuenta con un control o comando de encendido/apagado vía remota se deberá incluir un circuito que puede energizar o desenergizar al *driver* según convenga.

<sup>62</sup> Los autores.

Para cumplir con la función principal y las subfunciones ya mencionadas se desarrolló lo siguiente:

El PIC por si solo ya cuenta con un modulo interno para comunicaciones seriales. Este modulo, llamado USART (*Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*),<sup>63</sup> permite comunicarnos con el protocolo RS232 con solo un dispositivo. Las señales para transmisión y recepción; y sus parámetros son generados vía hardware es decir, son controlados por la electrónica interna del PIC que pertenece a dicho modulo. Para establecer la comunicación con el ESP 300 se utiliza el modulo USART, sin embargo es necesario comunicarse también con los otros dos dispositivos. Para ello se utilizan los puertos A y D del PIC, pero con la diferencia de que para establecer la transmisión y recepción de datos con estos dos dispositivos, las señales y los parámetros necesarios son generadas y controladas vía software por una de las librerías incluidas en el compilador de CCS que se utilizo para programar el PIC. Esta librería es fundamental para el programa interno del PIC y será tratada en el Cáp. 5

Para acoplar las señales a los niveles de voltaje requeridos por la norma se utilizó un circuito integrado MAX 232 para cada puerto serial, la sección 4.5.2 de este capítulo aborda a detalle las funciones de ese circuito.

Finalmente para encender y apagar al driver ESP 300 se utiliza una señal digital que proviene del pin cero del puerto B y que va hacia un circuito que utiliza un transistor TIP 120 que eleva la corriente de esta señal y activa a un relevador. El relevador es un interruptor operado magnéticamente. Este se activa o desactiva (dependiendo de la conexión) cuando el electroimán es energizado, en este caso por la señal que proviene del TIP 120. Esta operación causa que exista conexión o no entre las otras terminales del relevador a las que esta conectada la alimentación del ESP 300, logrando con esto una conexión y desconexión del ESP a la red eléctrica. La figura A-6 en el Apéndice A muestra el circuito.

---

<sup>63</sup> Hoja de especificaciones del PIC16F877A p.95.

#### 4.5.4 Conexiones.

Las conexiones a cada uno de los dispositivos se logran a través de conectores DB9, como se puede observar en la Fig. A-6, y cables seriales de 9 hilos como los que se utilizan comúnmente para las PC. Para el distanciómetro se requirió que una de las terminales del cable serial fuera modificada, para poder encajar con el tipo de conector que posee el DI 3000, para ello se fabrico un conector especial cuyo diseño se baso principalmente en el esquema que se encuentra en la Fig. A-7.

Otro caso especial es el tipo de conexión del ESP 300. Para lograr comunicarse adecuadamente con el *driver* es necesario utilizar señales de acoplamiento. En la figura A-5 se puede ver que los pines 4, 7 y 8 del conector DB9 del ESP 300 corresponden respectivamente a las señales DTR, CTS y RTS. Como se explica en la sección 4.2 de este capítulo, estas señales corresponden a las llamadas señales de acoplamiento, algunos dispositivos como el ESP 300 requieren que dichas señales estén presentes para poder entablar comunicación, sin embargo pueden ser proporcionadas por un medio físico, por ello se utilizó para el ESP un esquema de conexión como el de la Fig. 4.7.

## **CAPITULO 5: PROGRAMACIÓN Y CONTROL.**

Debido a las características propias de los equipos asociados, el tipo de controlador requerido para este sistema es por estados. Esto es debido a que no se requiere de un dispositivo que deba responder a perturbaciones externas para corregir, por ejemplo, una condición predeterminada.

Es común que los sistemas que usan controles por estados no requieran de retroalimentación, es decir, que sean controladores de lazo abierto. Los dispositivos que se rigen por este modo de operación se distinguen por llevar a cabo la tarea para la cual están diseñados sin verificar que se haya realizado la misma.

El distanciómetro DI3000 (EDM) emite un carácter cada vez que realiza una acción excepto cuando se requiere una toma de distancia y no hay retorno de señal. El EDM se mantiene en ese modo hasta que haya señal. En tal caso el controlador debe de ser capaz de monitorear esa acción y actuar en consecuencia, sacando al distanciómetro de ese estado y continuando las funciones de manera ininterrumpida.

El ESP300 es un controlador que proporciona la información solicitada. De esta manera, el diseño del controlador por estados permite seleccionar, con base en datos de entrada, salida y ausencia de estos, cual debe ser la siguiente tarea a cumplir, verificando que la tarea principal (obtención de datos de la red geodésica) se realice de manera continua.

### **5.1 CONTROLADOR Y MICROCONTROLADOR.**

Recibe el nombre de controlador el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de un horno dispone de un sensor que mide constantemente su temperatura interna y, cuando traspasa los límites prefijados, genera las señales adecuadas que accionan los actuadores que intentan llevar el valor de la temperatura dentro del rango estipulado.

En la sección 4.5.1 se dio a conocer de manera formal el concepto de microcontrolador. En resumen se puede decir que el microcontrolador es una sencilla pero completa computadora contenida en un circuito integrado<sup>64</sup>.

---

<sup>64</sup> Martín Cuenca Eugenio, Angulo Usategi José María, Angulo Martínez Ignacio  
"Microcontroladores PIC la solución en un chip", Editorial Paraninfo, México 1998 Pág. 5.

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

- Procesador o CPU (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM/E<sup>2</sup>PROM.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, puertos serie y paralelo, CAD: Convertidor Analógico/Digital, CDA: Convertidor Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los productos que para su regulación incorporan un microcontrolador disponen de las siguientes ventajas:

- Aumento de prestaciones: un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.
- Aumento de la fiabilidad: al reemplazar un elevado número de elementos por un microcontrolador se disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.
- Reducción del tamaño en el producto acabado: La integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los *stocks*.
- Mayor flexibilidad: las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

El microcontrolador es en definitiva un circuito integrado que incluye todos los componentes de una computadora. Debido a su reducido tamaño es posible montar el microcontrolador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador implantado (*embedded controller*).

### **5.1.1 DIFERENCIAS ENTRE UN SISTEMA “EMBEDDED” (IMPLANTADO) Y UNA PC.**

Los sistemas *embedded* o implantados son diseños que se hacen con un microcontrolador pequeño como lo son los PIC's. Estos microcontroladores combinan una unidad microprocesadora (como el CPU en una PC), circuitos adicionales llamados periféricos, además de circuitos dentro del mismo componente para hacer un pequeño módulo de control que requiere de pocos dispositivos externos. Este dispositivo se puede implantar dentro de otros componentes electrónicos y mecánicos para obtener un control digital de bajo costo.<sup>65</sup>

La principal diferencia entre un microcontrolador y una PC es que el microcontrolador esta encargado de una o varias tareas específicas y la PC esta diseñada para correr varios tipos de programas y conectar diferentes tipos de dispositivos externos. Un microcontrolador tiene un solo programa y consecuentemente hace más fácil el cómputo de este y realiza la tarea específica con alta probabilidad de éxito.

Las ventajas que ofrece un sistema implantado en lugar de una PC en el sitio de trabajo son:

- Un menor consumo de energía.
- El costo del controlador es muchísimo menor.
- Se puede ampliar el control si es necesario añadir nuevos dispositivos.
- En caso de falla, se puede sustituir fácilmente cualquier componente de la tarjeta ó incluso cambiar la tarjeta totalmente gracias a que es relativamente barata.

## **5.2 PROGRAMACIÓN.**

Antes de abordar la programación que se realizó para obtener un prototipo funcional, se hará el planteamiento del problema a resolver de manera general. Se reseñarán los programas que se utilizaron, se abordarán los problemas encontrados en la realización de los programas y se presentarán las soluciones adoptadas para hacer un prototipo funcional.

### **5.2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

En general se requiere poner en acción un sistema que recoja información de la distancia que existe entre un distanciómetro láser y una red de prismas colocados en los flancos de un volcán activo. El sistema debe transmitir la información hasta una estación de control y ser capaz de guardar la información en una base de datos para su consulta.

---

<sup>65</sup> Manual de usuario del MPLAB IDE.

Para realizar dicha tarea primero se evalúa si el microcontrolador por sí solo es capaz de soportar la carga de trabajo que implica monitorear cada posición de los motores en los dos ejes para cada prisma y verificar si existe señal en el distanciómetro para poder tomar la medición, además de transmitir la información hasta la estación de control. Después de ciertas pruebas se tomó la decisión de utilizar al microcontrolador como un multiplexor de señal que únicamente repartiera los comandos al dispositivo que se le indicara y transmitiera la información que los dispositivos retornaran.

De aquí surgió la idea de que sea la estación de control la encargada de llevar a cabo el control del sistema, ya que contaría con la información suficiente para que el sistema realice sus actividades de manera continua. La figura 5.1 muestra el diagrama general del sistema.

Por lo tanto serán necesarios dos programas para el control: uno que multiplexe la información en el centro de trabajo y otro que lleve a cabo el control general del sistema con la ayuda de una PC.

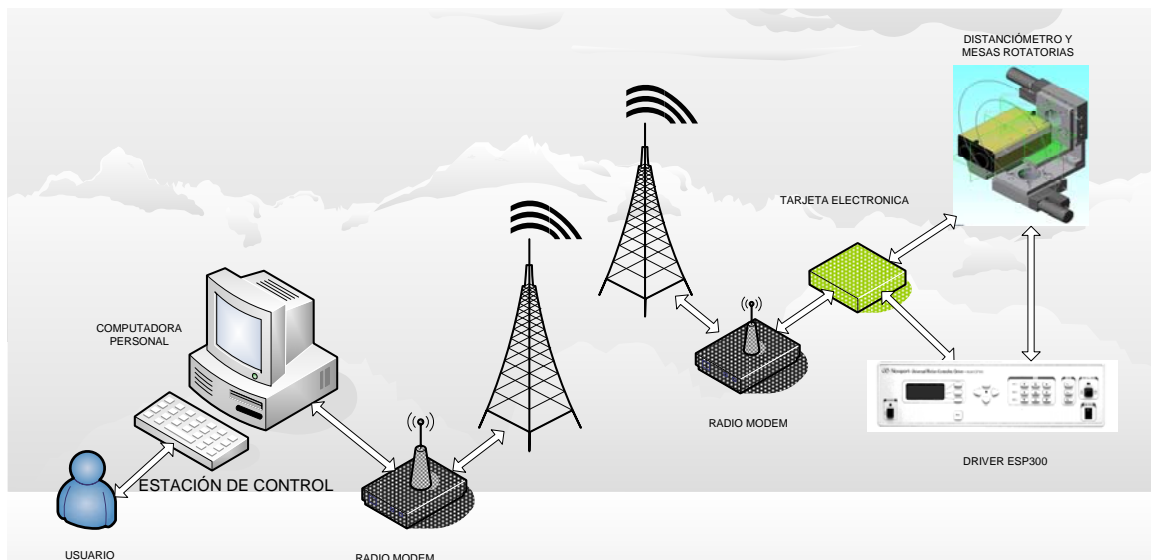


Fig. 5.1 Diagrama general del sistema<sup>66</sup>

<sup>66</sup> Los autores.

## 5.2.2 COMPILADOR CCS C.

Un compilador es un programa que traduce un programa escrito en un lenguaje de programación de texto (código fuente) a otro lenguaje de programación (objeto), generando un programa equivalente (ejecutable).

Generalmente los compiladores se utilizan para traducir un programa de un lenguaje de alto nivel, a otro lenguaje de nivel inferior (típicamente lenguaje máquina). De esta manera un programador puede diseñar un programa en un lenguaje mucho más cercano a como piensa un ser humano, para luego *compilarlo* a un programa manejable por una computadora.

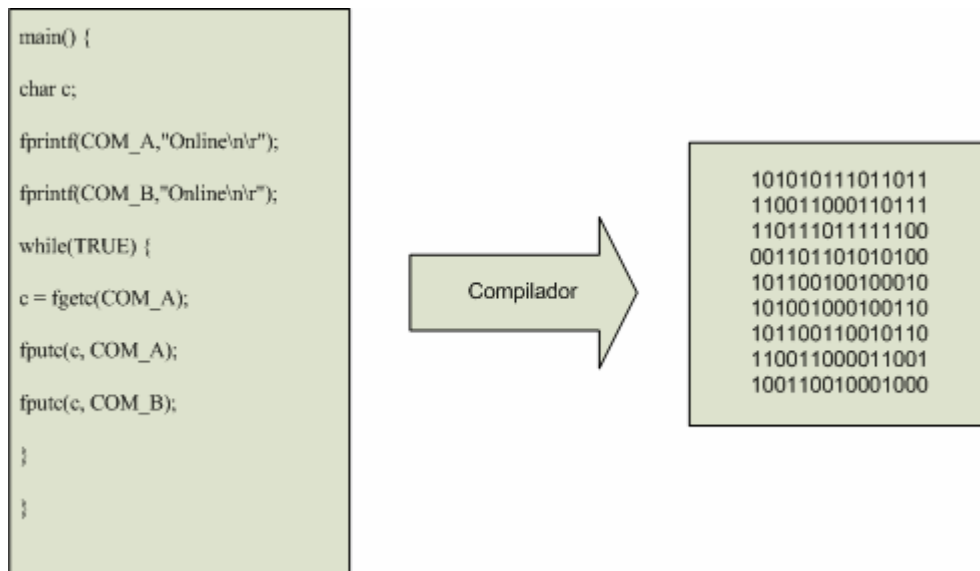


Fig.: 5.2 El compilador convierte de código fuente a instrucciones maquina<sup>67</sup>.

El compilador CCS (*Custom Computer Services*) para lenguaje C fue desarrollado exclusivamente para los PIC's optimizando el compilador para los componentes que fabrica la compañía *Microchip*<sup>68</sup>. El compilador contiene varias librerías para elaborar proyectos con una mejor comprensión y rapidez en el desarrollo de programas para microcontroladores.

Para la realización del programa para el PIC, el compilador CCS C fue de gran ayuda ya que ofrece la ventaja de utilizar el lenguaje C para la programación del microcontrolador, pero la ventaja sustancial se deriva de las siguientes razones:

<sup>67</sup> Los autores.

<sup>68</sup> Disponible en <http://www.ccsinfo.com>



- Poder armar las comunicaciones seriales RS-232 requeridas para la comunicación con los dispositivos de cabecera que son el distanciómetro, el *driver* ESP 300 y el radio módem, ya que cada dispositivo se comunica a diferente velocidad, paridad y bits de parada. Con el compilador esta tarea se simplificó pues contiene una librería especial que configura los pines del PIC que uno desee para poder asignarlos como salida ó entrada de las comunicaciones para cada dispositivo<sup>69</sup>. Esta misma librería permite configurar el tipo de comunicación con un dispositivo: si es por software o por hardware<sup>70</sup>. El termino mejor conocido para lo anterior es “*handsanking*” como se describió en el capítulo 4. La ventaja en este punto proviene de que el ESP300 tiene un control de comunicación por software. Esto requiere una señal que le indica si va a enviar o recibir un caracter. La librería proporciona esta señal siempre y cuando se le indique que para ese dispositivo la comunicación será por software, además de colocar a dicho dispositivo en el puerto determinado por el PIC para una comunicación serial. El puerto para nuestro PIC es el puerto C.
- Permite el manejo de control por interrupciones en los puertos. La ventaja es que permite verificar si hay un regreso en la comunicación con el EDM, ya que al recibir éste un comando del cual el PIC esperara un regreso y el distanciómetro no lo envía, el PIC se detenía en esa instrucción sin permitir la continuidad del programa. Con el compilador se puede verificar la interrupción en el pin de recepción del EDM permitiendo decidir, dependiendo de la respuesta ó la ausencia de esta.
- Tanto el ESP300 como el EDM necesitan que al final del comando se les envíe un caracter de retorno de carro mejor conocido como “*enter*” para identificar el fin de comando. El compilador tiene una función especial para poder enviar al final de cada comando el carácter requerido.

---

<sup>69</sup> Tutorial para CCS C pag. 26.

<sup>70</sup> Tutorial para CCS C pag. 26.

### 5.2.3 PROGRAMA PARA EL PIC.

#### Descripción.

Esta sección aborda el desarrollo de un programa para un PIC 16F877A, el cual, como se ha señalado en secciones anteriores deberá comunicarse con tres dispositivos: el distanciómetro, el *driver* ESP 300 y un radio módem. El PIC estará recibiendo caracteres del radio módem los cuales transportan la información del comando a ejecutar y hacia que dispositivo se dirige ese comando. El programa tendrá que analizar la información recibida y enviar el comando únicamente al dispositivo indicado, esto es, tendrá que discriminar el carácter de reconocimiento de dispositivo y enviar el comando filtrado al dispositivo. Asimismo, esperará información de los dispositivos y la enviará al radio módem. En general la función del PIC es la de multiplexar la información que recibe, analizando el carácter de reconocimiento de dispositivo, sin hacer ningún tipo de control adicional. El PIC adicionalmente deberá activar un relevador para que este pueda encender al *driver* ESP 300 debido a que este no tiene un comando para ello.

Tabla 5.1 Entradas y salidas de los puertos del PIC.<sup>71</sup>

UBICACIÓN	TIPO	DESCRIPCIÓN
Puerto A.2	Salida	Señal de transmisión para el EDM
Puerto A.3	Entrada	Señal de recepción para el EDM
Puerto B.1	Salida	Señal del relevador para el encendido del <i>driver</i> ESP 300
Puerto C.6	Salida	Señal de transmisión para el <i>driver</i> ESP 300
Puerto C.7	Entrada	Señal de recepción para el <i>driver</i> ESP 300
Puerto D.6	Salida	Señal de transmisión para el radio módem
Puerto D.7	Entrada	Señal de recepción para el radio módem

Para llevar a cabo las tareas asignadas al microcontrolador y para dar una mejor explicación de este programa, se dividirá en las siguientes funciones:

- Función principal: Esta función es la encargada de organizar la entrada de las funciones auxiliares. Primeramente recibe los caracteres enviados desde la estación de control y llama a la función “*agregar al buffer*”. Posteriormente procesa el comando y finalmente se limpia la variable en la cual se guardan los datos que envía la estación de control para esperar los nuevos datos. El diagrama de flujo de esta función se muestra en el apéndice C, Fig 1.

<sup>71</sup> Los autores.

- Función “*agregar al buffer*”: Recordando que la comunicación serial se da caracter tras caracter, cada letra que sea recibida por la función principal será almacenada en ésta función. Su tarea será unir los caracteres recibidos y colocarlos en cadena, además de activar una bandera cuando reconozca el caracter que indica el fin de la cadena ó término del comando. El diagrama de flujo de esta función se encuentra en la figura C-2.
- Función de procesamiento de comando: Esta función es la parte central del programa ya que utiliza la cadena formada en la función *agregar al buffer*, e inicia la ejecución de acciones. Para optimizar el funcionamiento de esta función, se implementó un protocolo de comunicación entre la estación de control y las acciones a realizar por el microcontrolador. Este protocolo se describirá en detalle más adelante. La tarea general de esta función es realizar la depuración del comando, la distribución de la información al dispositivo que se le indique, y esperar la información que de los dispositivos se genere para agregarle el carácter del protocolo de comunicación. De esta forma, la estación de control infiere de que tipo de dato se trata. Esta función se describe en el diagrama de flujo en la figura C-3.
- Función de limpieza de datos: Esta función se llama una vez que se termina de procesar el comando y borra el buffer para esperar el nuevo comando.

#### **5.2.4 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN DEL SISTEMA.**

Los protocolos son reglas de comunicación que permiten el flujo de información entre diferentes computadoras que manejan lenguajes distintos. Por ejemplo, dos computadoras conectadas en la misma red pero con protocolos diferentes no podrían comunicarse jamás. Para ello, es necesario que ambas "comprendan" el mismo idioma. Para ello, nos dimos a la tarea de armar el protocolo de comunicación para el sistema de tal manera que el programa para el PIC y el programa en *Visual Basic* trabajen bajo el mismo esquema.

Se decidió que caracteres en mayúsculas fueran enviados por la PC a la tarjeta electrónica indicando cuales son las acciones a ejecutar ó a que dispositivo tiene que enviarse el comando recibido. Está decisión fue tomada por que los comandos disponibles para el EDM están en mayúsculas. La Tabla 5.2 describe los comandos en mayúsculas y al identificador de fin de envío, que esta en minúscula, De esta forma el microcontrolador permite el paso de caracteres en mayúsculas hasta que encuentre la “d” que le indica que “detenga” el paso de caracteres.

Tabla 5.2 caracteres de reconocimiento de reconocimiento de la PC a la tarjeta<sup>72</sup>.

Carácter	Descripción
P	Prueba de señal del EDM
E	Encender el sistema
F	Apagar el sistema
L	Identificador para comando del EDM
D	Identificador para comando del ESP
d	Identificador de fin de envío

Los caracteres listados en la tabla 5.3, que deben ser reconocidos por la PC para que el programa en Visual Basic tome decisiones, están en minúsculas. Esto no obedece a ningún formato en especial y sólo es para diferenciarlos de los caracteres anteriores:

Tabla 5.3 Caracteres de reconocimiento de la tarjeta a la PC<sup>73</sup>.

Carácter	Descripción
o	Sistema apagado se confirma con “?”
e	Sistema encendido se confirma con “?”
s	Señal del EDM encontrada
l	EDM sin señal
i	Dato de una medición rápida del EDM
h	Dato de una medición normal del EDM
t	Dato booleano de termino de movimiento en ESP300
p	Dato de posición del ESP300
b	Se encuentra al final de los letreros
m	Orden de paro al EDM se confirma con “?”
a	Orden de encendido al EDM se confirma con “?”
n	Orden de apagado al EDM se confirma con “?”

Es importante mencionar que estos caracteres vienen al final de la información que proporcionan los dispositivos, es decir, son añadidos por el programa del PIC.

---

<sup>72</sup> Los autores.

<sup>73</sup> Los autores.

### 5.2.4.1 COMANDOS.

El *driver* ESP 300 cuenta con más de 100 comandos *ASCII* para realizar su función. A continuación se mencionan los más importantes para el proyecto.

Tabla 5.4 Caracteres ASCII para el ESP 300<sup>74</sup>.

Carácter ASCII	Descripción
1TP	Pide la posición en la que se encuentra el eje 1 (eje de movimiento horizontal)
2TP	Pide la posición en la que se encuentra el eje 2 (eje de movimiento vertical)
XXMO	Encendido de la mesa rotatoria del eje deseado.
XXMF	Apaga la mesa rotatoria del eje deseado
RS	Reinicia el controlador
XXPAnn	Mueve el eje deseado a la posición absoluta deseada siempre que esta no sobrepase los límites viaje de los servomotores en este caso serán de 360°
XXPRnn	Mueve el eje deseado relativamente las unidades que se deseen respecto de la posición actual.
TB	Pide la detección de algún error que se haya generado y devuelve la descripción de este y el número de error
XXMD?	Pregunta si se ha realizado el movimiento en el eje deseado y devuelve un 1 si lo realizó y 0 si está en movimiento

Los comandos que obtuvimos para el distanciómetro DI3000 se describen en el capítulo 4 en la sección 4.2.2 de la presente tesis.

---

<sup>74</sup> NEWPORT, "Manual de Usuario ESP300 Motion Controller/Driver", Págs.20-173 en la tercera sección.

## 5.2.5 PROGRAMA EN VISUAL BASIC.

### Descripción.

Esta sección trata del desarrollo de un programa amigable para el usuario y que no requiera grandes conocimientos de uso de software para poder operarlo, por lo que sólo tiene dos tipos de control: uno que se ejecute accionando un botón y otro que permita operar el sistema de manera total.

El primero iniciará una rutina general del sistema que no permitirá al usuario interactuar con el programa hasta que la rutina finalice. Sin embargo el usuario podrá ver como se van desarrollan las acciones del sistema y podrá visualizar los resultados de las mediciones en forma inmediata.

El segundo tipo de control requiere que el operador conozca al menos algunos comandos requeridos por los dispositivos. Dependiendo de que acciones vaya a realizar podría incluso prescindir de ellos pues con solo pulsar botones podrá realizar las actividades importantes del sistema, como posicionar los motores, hacer pruebas de señal en el EDM, hacer mediciones, etc. Este control es necesario ya que al montar el dispositivo en el lugar de trabajo se tendrá que hacer la localización de los prismas. Una vez localizados se podrá guardar la posición en la que se encuentran y accionar la rutina general para ser localizados y medidos nuevamente.

El programa en *Visual Basic* debe guardar las distancias encontradas entre el distanciómetro y los prismas en una base de datos para su consulta en el momento que se desee. En la figura C-4 se encuentra un diagrama de flujo para este programa.

La ventana ejecutable para *Windows* que constituye el sistema de control se muestra a continuación:

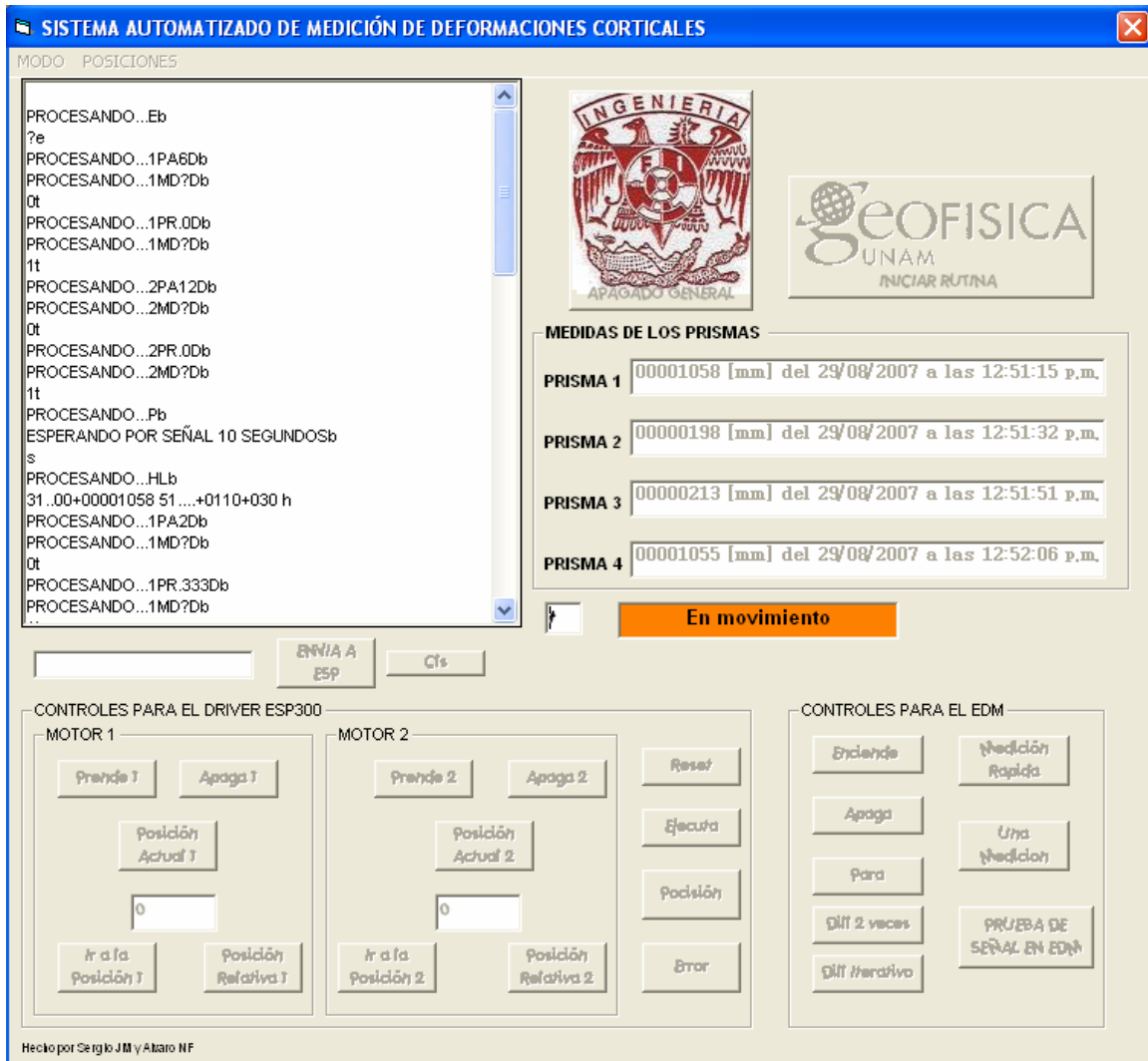


Fig. 5.3 forma principal del programa en visual Basic<sup>75</sup>.

Antes de encender el sistema el usuario puede preseleccionar si desea que el sistema realice un control por rutina ó un control total. También puede elegir un registro previamente guardado de las posiciones a las que se desea dirigir el sistema. En caso contrario, el programa tiene preseleccionadas posiciones por defecto.

En la parte superior de la ventana ejecutable se encuentra el siguiente menú:

MODO POSICIONES

Al seleccionar MODO se encontrará con dos opciones: una que indica un control por rutina y otra que indica un control total. Por defecto estará seleccionada la opción de rutina.

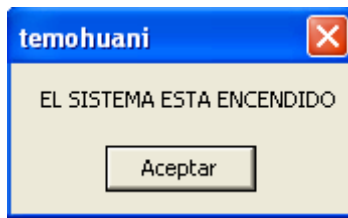
<sup>75</sup> Los autores

Al seleccionar POSICIONES aparecerán dos submenús:

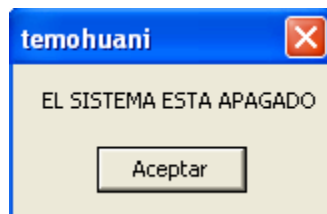
**MOSTRAR:** Esta acción abrirá una forma en la que se podrán visualizar las posiciones actuales que ejecutará el programa.

**REGISTROS:** Esta acción abrirá una forma en la cual el usuario puede agregar nuevas posiciones para el sistema, permitiéndole guardarlas y nombrarlas para su uso por un control por rutina. Esta acción permitirá ampliar la medición de más prismas en la red geodésica.

Una vez que se han hecho las preselecciones pertinentes el usuario puede dar clic al botón de encendido general y en la ventana de estado se podrá ver la actividad del comando que se esta procesando. El usuario esperará a que el sistema confirme que se han encendido en su totalidad todos los dispositivos y se mostrará el mensaje:



Una vez confirmada esta acción se le permitirá dar clic al botón e iniciar rutina si esa fue su preselección. De lo contrario tendrá activados los botones que le permitirán controlar el sistema de manera total. Al finalizar las actividades, antes de cerrar el programa, deberá apagar el sistema y esperar que este le confirme con el mensaje:



En ese momento podrá cerrar el programa con toda seguridad.



### 5.2.5.1 CONTROL POR RUTINA.

Una vez seleccionado el registro de posiciones que se va a utilizar, puede dar clic en el botón “iniciar rutina”. Este evento ejecutará las siguientes acciones:

- Ir a la posición del prisma 1. Para ello primero hará la trayectoria del eje horizontal y posteriormente la del eje vertical.
- Probar si existe señal en el distanciómetro, esto es, ordena al EDM hacer una medición rápida y verifica si el prisma regresa el haz.
- Si la comprobación es positiva pide al EDM que haga una medición iterada en la cual el distanciómetro regresa el promedio de las mediciones. La medida resultante es presentada en la forma principal, con la hora y la fecha, además de enviarla a una base de datos.
- Si la comprobación es negativa (no hubo retorno de señal) el programa podrá ejecutar una rutina de búsqueda cuya función principal es buscar la nueva posición del prisma que en ese momento se esta midiendo, la manera en que se busca al prisma es desde el centro hacia afuera, usando la trayectoria de una espiral cuadrada (Fig. 5.4). El círculo en el centro representa la ultima posición conocida del prisma en cuestión. Cada uno de los segmentos que conforman la espiral representan desplazamientos del sistema, de tal manera que al finalizar cada desplazamiento el algoritmo verifica la presencia o ausencia de señal en el EDM, y determina si es necesario continuar con la búsqueda o pasar a la posición del prisma siguiente.

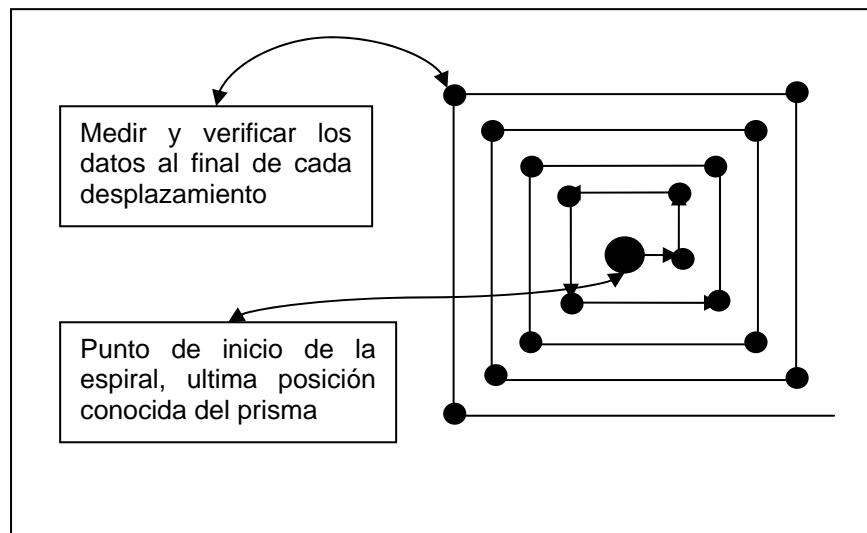


Fig. 5.4 Forma de búsqueda<sup>76</sup>.

<sup>76</sup> Los autores

Para que el sistema tome la decisión de pasar a la posición del siguiente prisma se deben cumplir dos condiciones: la primera es que dentro de la búsqueda se haya localizado y medido al prisma. La segunda es que, si no se encontró el prisma después de que el sistema se ha desplazado hasta 9 grados en cualquiera de sus dos ejes y aparece el mensaje “No se encontró al prisma” y entonces pasa al prisma siguiente. En la sección 5.3 se presentan las características de una rutina de búsqueda basada en la calidad de los datos obtenidos en la medición.

- Se repetirá el ciclo para cada uno de los prismas.
- Una vez que ha finalizado la rutina el sistema presentará un mensaje que confirma dicha acción.
- Se mostrará en una barra de estado que se encuentra debajo de la medida de los prismas la actividad que en ese momento está realizando el sistema.

### **5.2.5.2 CONTROL TOTAL.**

En esta sección se describe como el usuario podrá enviar comandos al EDM y al ESP de forma independiente. A continuación se describen las acciones que se ejecutan presionando los botones de la forma principal.

#### **CONTROLES PARA EL EDM.**

ENCIENDE: Activa el dispositivo.

APAGA: Apaga el dispositivo.

PARA: Indica que detenga cualquier acción que este realizando y espere un nuevo comando.

PRUEBA DE SEÑAL EDM: Esta acción pide que haga una medición rápida. Si el EDM tiene señal retornará una "s" y si no tuviera señal permanecerá en ese estado por 10 segundos y regresará una "l" estos caracteres se pueden visualizar en la forma principal, al lado de la barra de estado. Por lo tanto sólo si la señal del EDM es devuelta se podrán ejecutar las siguientes acciones:

MEDICION RAPIDA: Pide al distanciómetro que haga una medición y regresa la medición tal como la proporciona el EDM.

UNA MEDICIÓN: Hace una medición rápida dos veces y regresa el promedio de las mediciones.

DILL 2 VECES: repite la acción de una medición ejecutándola por duplicado con el fin de que se confirme la primera medición.

DILL ITERATIVO: Hace diez mediciones rápidas de forma ininterrumpida y las presenta en la ventana de estado.

#### **CONTROLES PARA EL DRIVER ESP 300.**

En la forma principal están implantados los controles para los motores por ejes, el motor 1 es para el eje horizontal y el motor 2 es para el eje vertical. Las acciones a realizar para estos motores son:

PRENDE: Activa la mesa que contiene al motor.

APAGA: Apaga la mesa del motor.

POSICIÓN ACTUAL: Pide la posición actual de la mesa rotatoria.

**IR A LA POSICIÓN:** Indica a la mesa rotatoria que se vaya a una posición absoluta para esto se tendrá que indicar en el recuadro en blanco la posición dada en grados.

**IR A POSICIÓN RELATIVA:** Indica a la mesa que se mueva relativamente de la posición en la que se encuentra en ese momento el número de grados indicados en el recuadro en blanco.

Afuera del recuadro de los motores se encuentran los controles que ejecutan:

**RESET:** Reinicia al *driver*, lo que ocasionaría que al encender nuevamente tome la posición cero de los motores.

**POSICIÓN:** Pide la posición de las mesas en los dos ejes.

**EJECUTA:** El *driver* ejecuta un programa de posiciones previamente definido.

**ERROR:** Cuestiona al *driver* si se ha generado algún error en su actividad, esté puede devolver el número de error y una breve descripción del mismo para hacer una mejor identificación del error se puede consultar el manual de usuario del ESP 300.

Como el driver ESP300 cuenta con más de 100 comandos para su funcionamiento, es posible enviar cualquiera de ellos desde la forma principal. Debajo de la ventana de estado se encuentra un recuadro en blanco donde se coloca el comando deseado y se ejecuta el evento ENVIAR A ESP. Para ello el comando preferentemente debe estar escrito en mayúsculas.

### 5.3 SOBRE LA RUTINA DE BÚSQUEDA.

En algunos casos las perturbaciones atmosféricas o posibles desplazamientos de los prismas causados por la deformación del volcán o por movimientos locales del terreno o por dificultades en la reubicación de los prismas por falta de precisión de los motores y controladores anteriores, pueden hacer que la señal de retorno del EDM no sea óptima o simplemente no se presente. El sistema anterior tenía la capacidad de buscar el objetivo o reflector en caso de que se presentaran situaciones en las que no fuera posible ubicar al prisma o la intensidad de la señal no fuera la más adecuada. Para ello el sistema empleaba un algoritmo de búsqueda para ubicar la nueva posición del prisma, tomando como referencia la posición en la que originalmente debía ser localizado. La forma en la que se buscaba la nueva posición del prisma era desde el centro hacia afuera usando un recorrido que sigue la trayectoria de una espiral de forma cuadrada (refiérase a la Fig. 5.4).

Cada uno de los segmentos de la espiral estaba conformado por desplazamientos en el sistema, de tal manera que al final de cada desplazamiento se verificaba la intensidad de la señal de retorno del distanciómetro. El algoritmo permitía al sistema hacer una selección entre avanzar o retroceder sobre la trayectoria de la espiral de manera que se obtuviera la mejor intensidad.

La selección del sistema anterior entre realizar o no la rutina de búsqueda, estaba basada principalmente en la intensidad de la señal del EDM, la cual era proporcionada por el propio EDM en forma de una señal acústica y adquirida por el sistema a través de un micrófono y un circuito electrónico.

En el sistema actual, tema de la presente tesis, sólo se ha incluido un algoritmo de búsqueda, en el cual la elección que debe tomar el sistema es entre realizar la rutina de búsqueda o continuar con la medición, con base únicamente en la existencia o ausencia de la señal de retorno del EDM, y no en la intensidad de esta señal. Las razones principales por las que se incluye un algoritmo de este tipo, son;

1. Se ha dado poco énfasis al desarrollo de esta rutina debido a que la repetibilidad y la precisión de los motores que se utilizan en este sistema contribuyen a tener un mejor desempeño, ya que las mesas rotatorias ofrecen una repetibilidad al origen de  $0.002^\circ$  y una repetibilidad (unidireccional) de  $0.006^{77}$ , lo cual genera un error mínimo para volver a llegar a la posición donde se encuentra el prisma.

---

<sup>77</sup> Tabla B-5

2. En el EDM Leica DI3000 solo es posible conocer la intensidad de la señal de retorno a través de una barra de leds colocada en la parte posterior, junto al panel de botones, vía remota. No se cuenta con algún comando que proporcione información sobre dicha intensidad que pueda ser transmitida a través de la comunicación serial que se tiene con el distanciómetro. Esto dificulta la implementación de un algoritmo de este tipo.

Sin embargo el diseño del controlador del sistema permite incluir nuevas subrutinas o subfunciones directamente en el código del programa principal que se encuentra en la PC que tiene interfaz directa con el usuario, sin necesidad de incluir nuevos componentes de hardware. Tomando como base lo anterior es posible incorporar una rutina de búsqueda que base su selección en los datos obtenidos al momento de la medición.

Gracias a la experiencia de las personas encargadas del monitoreo volcánico, a través de la medida de deformaciones, se ha encontrado que los datos que son tomados con una intensidad de señal pobre, tienden a generar una variancia significativa (esto es, una dispersión considerable alrededor de la media), aun cuando son obtenidos en las mismas condiciones climáticas. Así, haciendo un análisis estadístico de las mediciones obtenidas de un mismo prisma es posible inferir la calidad de la señal con base a la desviación estándar de los datos.

Es, por tanto, factible elaborar un programa que calcule la desviación estándar de los datos obtenidos en el momento de la medición, y la compare con un parámetro predeterminado, que indica la calidad mínima aceptable de los datos obtenidos. Si ésta es suficiente, el programa determinará que no es necesario arrancar una rutina de búsqueda. En caso contrario el programa decidirá que es necesario realizar una rutina de búsqueda hasta que los datos reduzcan significativamente su variancia y con esto se infiera que se ha obtenido la mejor intensidad en la señal de retorno del EDM.

La forma en que el sistema debe moverse, cuando se esta realizando la búsqueda es idéntica a la del sistema anterior, en forma de un espiral cuadrada. El sistema deberá desplazarse a través de cada segmento de la espiral, tomando una serie de medidas al final de cada desplazamiento y verificando la condición predeterminada para calidad de los datos obtenidos en ese instante (Fig. 5.4). Es posible que debido a otras causas diferentes a condiciones atmosféricas o deformación del volcán, le sea imposible al sistema encontrar una señal de retorno (p.e. robo o extravió del prisma, obstrucción del prisma). En ese caso se debe definir el número de desplazamientos en la espiral necesarios para que el sistema finalice la búsqueda y concluya que ese prisma no puede ser medido.

En conclusión, se considera que el control y la programación del sistema diseñado logran establecer una comunicación eficiente entre los dispositivos que conforman el sistema, gracias a la implementación de un protocolo basado en el tipo de datos y comandos que se manejan en todo el sistema. El programa de interfaz con el usuario incorpora la opción de un control total del sistema y un control por rutina de una manera sencilla y amigable para el usuario. Adicionalmente es posible incrementar la complejidad y eficiencia en los algoritmos de control sin la necesidad de incluir nuevos componentes de tipo hardware.

## CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un sistema automatizado capaz de medir deformaciones volcánicas horizontales sobre distancias de varios kilómetros, con una precisión de  $5[\text{mm}] + 3 [\text{ppm}]$ . El nuevo diseño presenta mejoras importantes respecto de su predecesor en la facilidad y tiempo de instalación, lo que disminuye sustancialmente los trabajos de mantenimiento.
- Los cambios en el sistema de movimiento incrementan la precisión del sistema, las mesas rotatorias seleccionadas, con sensor de posición incluido en el ensamble, garantizan la resolución, y exactitud en sus movimientos, aumentando la repetibilidad del sistema.
- La configuración del sistema de control propuesta permite prescindir de una PC en el lugar de instalación. Si bien la confiabilidad de una computadora es alta su sistema operativo no está diseñado para trabajar en forma continua y los componentes electrónicos que utiliza no soportan las condiciones ambientales de los lugares de monitoreo. La inclusión de una tarjeta electrónica permite mantener gran parte del control en la PC de interfaz con el usuario, además de estar diseñada para uso continuo y soportar las condiciones ambientales requeridas (costo, mantenimiento, consumo).
- Por la manera en que están implementados los algoritmos de control, es posible que desde la computadora remota, accesible directamente con el usuario, se ejerza un control total del sistema, permitiendo con esto establecer nuevas posiciones de origen, medir puntos que no estén preestablecidos en la red geodésica o en los registros del sistema, establecer nuevos parámetros de medición en el distanciómetro y otras acciones útiles para el usuario.
- Se pueden implementar nuevas versiones del software de control fácilmente, sin tener la necesidad de incluir nuevos componentes de hardware en el sistema, siempre y cuando se respete el protocolo establecido por los autores para el intercambio de datos.
- El sistema desarrollado es competitivo en costo, con otros sistemas que se le asemejan en el mercado, como pueden ser las estaciones totales, además tiene la ventaja de poseer características de uso específico, como un control total de las funciones a distancia, del que carecen las estaciones totales comerciales.



- La utilización en el proyecto de un distanciómetro que se encuentra descontinuado dificulta en cierta medida la evolución del mismo, sin embargo en la actualidad no es posible encontrar en el mercado un distanciómetro, como un módulo separado y con el rango de medida que requiere el sistema. Por estas razones para un trabajo a futuro será necesario el diseño y la fabricación de un distanciómetro basado en un láser de mayor potencia específicamente diseñado para nuevos sistemas con mayor alcance.
- Se realizaron pruebas en el laboratorio con el sistema midiendo solo dos reflectores, donde la máxima variación de las distancias obtenidas fue de 2 [mm], Una vez que se había indicado al sistema las coordenadas donde se encontraban los puntos a medir siempre fue posible encontrar señal de retorno y medir dichos puntos por lo que se corroboró la precisión y repetibilidad en los movimientos de los actuadores que indicó el fabricante. La velocidad angular con la que se desplaza el sistema entre puntos es de aproximadamente 2.5 [°/s] y el tiempo que le toma llevar a cabo una medición es de 6[s].

## APÉNDICE A ESQUEMATICOS Y CONEXIONES

**FIGURE 12-1: CRYSTAL/CERAMIC RESONATOR OPERATION (HS, XT OR LP OSC CONFIGURATION)**

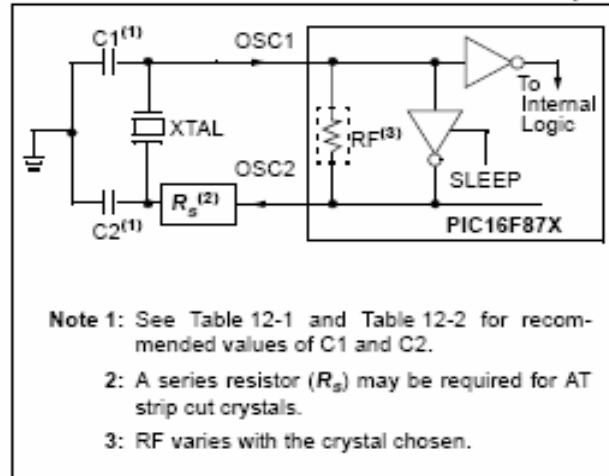


Figura A-1 Conexión del cristal para el circuito de reloj del PIC (Hoja de especificaciones del PIC16F877A p 121).

### MAX202E/MAX232E

PIN		NAME	FUNCTION
DIP/SO/TSSOP	LCC		
1, 3	2, 4	C1+, C1-	Terminals for positive charge-pump capacitor
2	3	V+	+2V <sub>CC</sub> voltage generated by the charge pump
4, 5	5, 7	C2+, C2-	Terminals for negative charge-pump capacitor
6	8	V-	-2V <sub>CC</sub> voltage generated by the charge pump
7, 14	9, 18	T_OUT	RS-232 Driver Outputs
8, 13	10, 17	R_IN	RS-232 Receiver Outputs
9, 12	12, 15	R_OUT	RS-232 Receiver Outputs
10, 11	13, 14	T_IN	RS-232 Driver Inputs
15	19	GND	Ground
16	20	V <sub>CC</sub>	+4.5V to +5.5V Supply-Voltage Input
—	1, 6, 11, 16	N.C.	No Connect—not internally connected.

Figura A-2 Funciones y nombres de los pines del MAX232 (Hoja de especificaciones del MAX232 p 6).

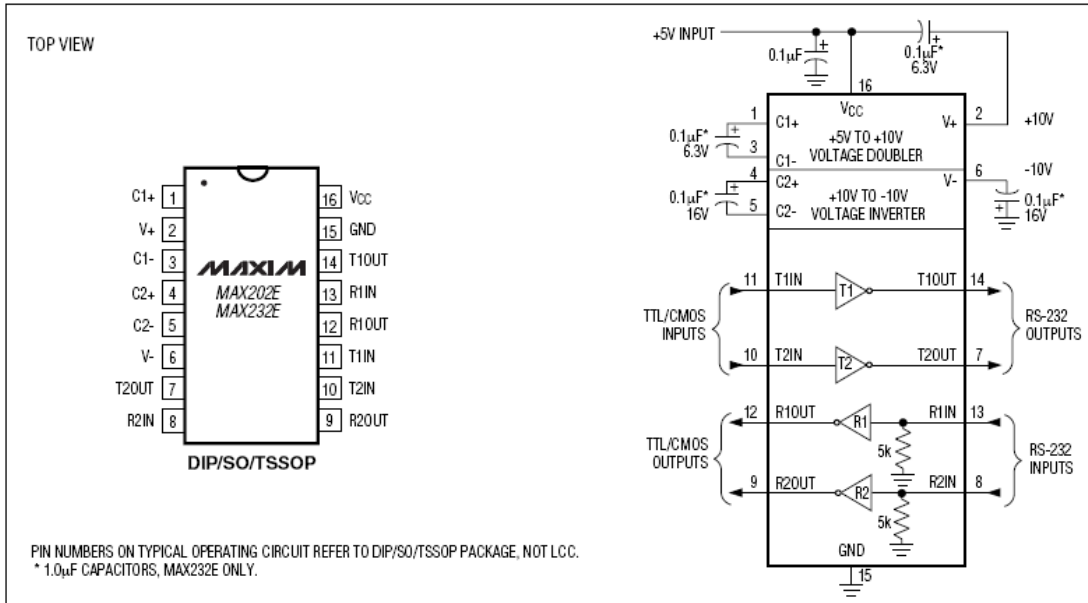


Fig. A-3 Pines y conexiones para el MAX232 (Hoja de especificaciones del MAX232 p 14).

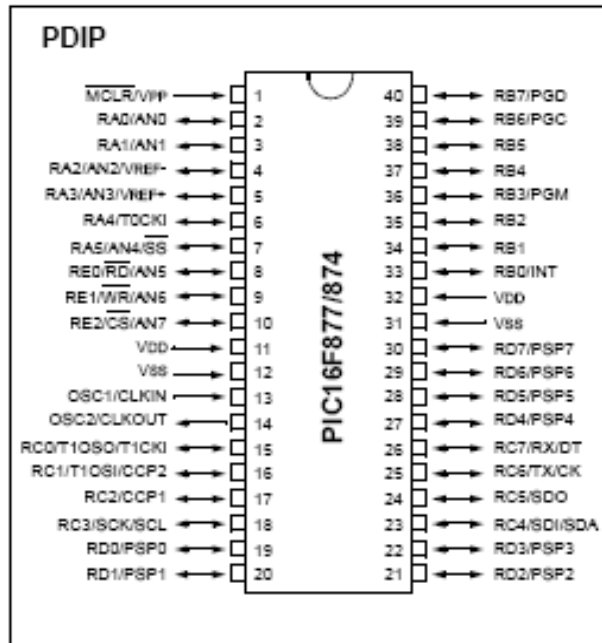


Figura A-4 Nombre de los pines del PIC16F877A (Hoja de especificaciones del PIC16F877A p 1).

Pin No.	Description
1 -----	<b>-15V</b>
2 -----	<b>TXD</b>
3 -----	<b>RXD</b>
4 -----	<b>DTR</b>
5 -----	<b>N/C</b>
6 -----	<b>-15V</b>
7 -----	<b>CTS</b>
8 -----	<b>RTS</b>
9 -----	<b>N/C</b>

Figura A-5 Pines y localización de las señales RS232 del ESP300 (Manual de Usuario ESP300 Motion Controller/Driver NEWPORT Apéndice C Pág. 7).

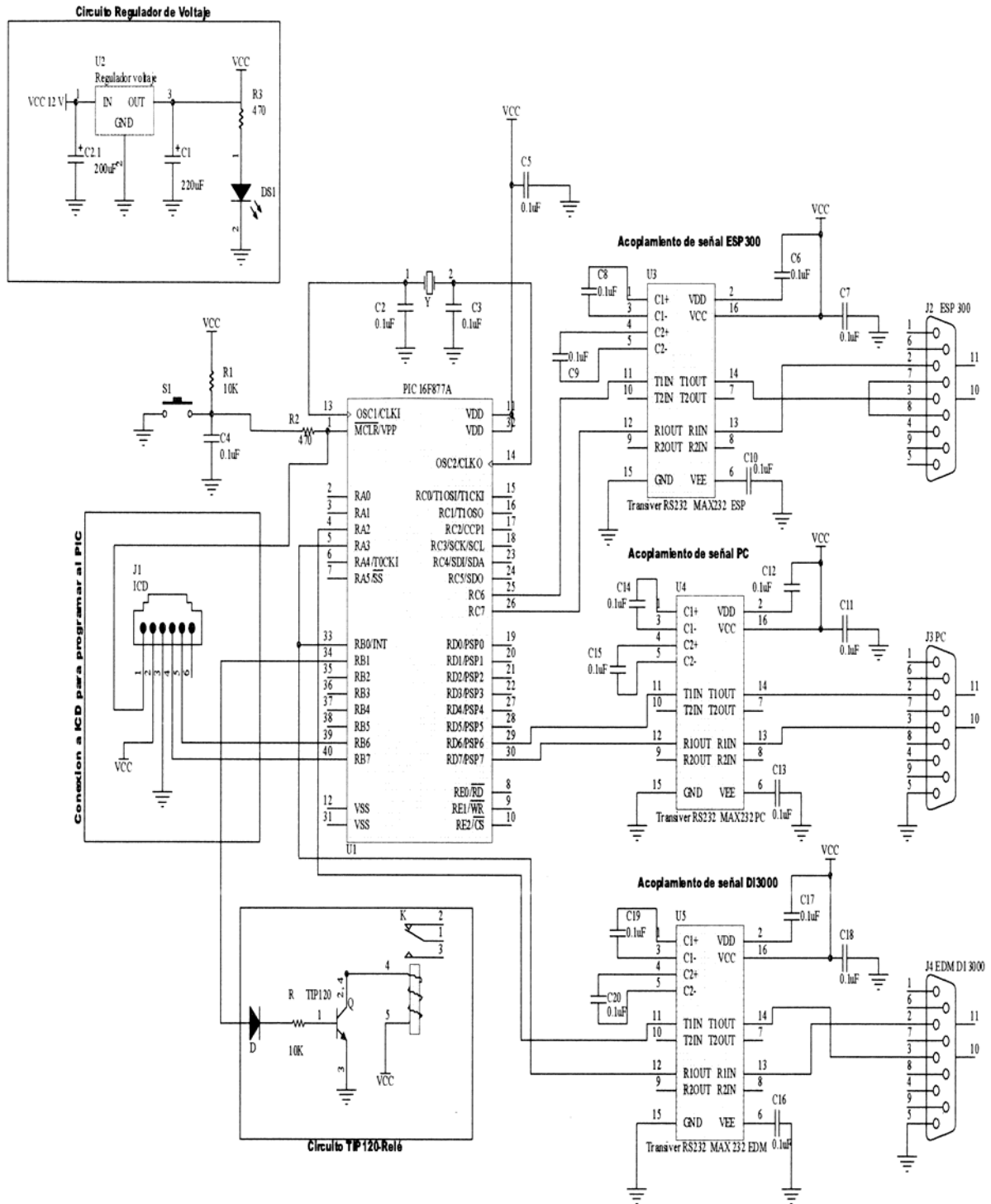


Figura A-6 Esquemático de la tarjeta electrónica (Los autores).

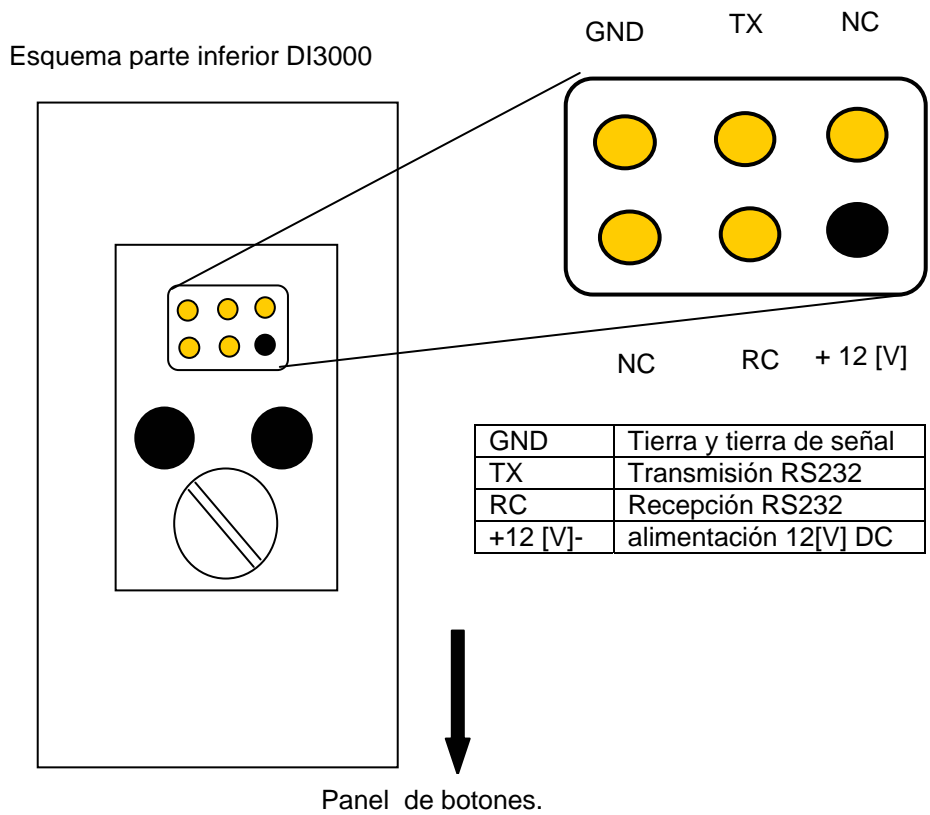


Figura A-7 Esquema de localización del conector al teodolito, nombre de los pines y localización de las señales RS232 del DI 3000 (los autores).

## APÉNDICE B TABLAS DE ESPECIFICACIONES.

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ESP 300.

Tabla B-1 Especificaciones técnicas *ESP 300*<sup>77</sup>

Categoría	Descripción
Número de ejes de movimiento:	De 1 a 3, en cualquier combinación u orden motores de pasos y de CD de escobilla bifásicos, hasta 48 [V] CD y 3[A] por eje.
Tipo de la trayectoria:	Perfil trapezoidal de velocidad y perfil de velocidad de S-curva.
Control de motor de DC.:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Encoder con resolución de 18 [Bits]</li> <li>Frecuencia máxima de entrada del encoder 4[MHz]</li> <li>PIDFF digital con 0.4 [ms] de retraso</li> </ul>
Control del motor de pasos:	1000 micro pasos por cada paso completo.
Interfaz con la Computadora:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rs232-c, 19200 [baudios], 8 [bits], 8, N, 1</li> <li>IEEE-488 - opcional,</li> </ul>
Uso general de la información:	16 [bits] de entrada/salida definidos por el usuario, en bloques de 8. Motor alejado de la entrada (dispositivo de seguridad).
Memoria Del Usuario:	Memoria permanente del programa de 64 [KB] Buffer de comandos de 512 [Bytes]
Modos de operación:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modo local - operación independiente, ejecutando el movimiento del panel delantero</li> <li>Modo remoto - ejecutando los comandos recibidos por una de las interfaces con la computadora o con el teclado numérico</li> <li>Modo de la ejecución de programa - ejecución de un programa almacenado.</li> </ul>
Exhibición opcional del modo de operación	LCD alfanumérico de 80 caracteres Posición de exhibiciones, estado, menús para uso general y pantallas <i>setup</i> .
Dimensiones:	75 x 412 x 300 [mm] para los modelos <i>ESP300-XXXXX1</i>
Requisitos de energía:	100-240 [V]AC el $\pm 10\%$ , 50/60 [Hz] máximo 4 [A] máximo para <i>ESP300 - XXXXX1</i> 6.3 [A] máximo para <i>ESP300 - XXXXX2</i>
Fusibles:	<ul style="list-style-type: none"> <li>T4A/250 [V]AC para los modelos <i>ESP300 - XXXXX1</i></li> <li>T6.3A/250 [V] AC para los modelos <i>ESP300 - XXXXX2</i></li> </ul>
Peso:	<ul style="list-style-type: none"> <li>6.37 [kg] para <i>ESP300 - XXXXX2</i></li> </ul>
Condiciones de funcionamiento:	Temperatura: 0 [°C] a 40 [°C] Humedad: 20% a 90% [RH], sin condensación

<sup>77</sup> NEWPORT, "Manual de Usuario ESP300 Motion Controller/Driver", Págs.21-22.

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS LEICA DI3000<sup>78</sup>.

### Exactitud y Tiempo de Medición:

Tabla B-2 Especificaciones técnicas DI 3000.

Botón en el panel	Descripción	Exactitud	Tiempo de medición
DIST	Medición de distancia estándar	5[mm] + 1[ppm]	3.5 [s]
DI	Medición rápida	10[mm] + 1[ppm]	0.8 [s]
DIL	Medición de repetición	5[mm] + 1[ppm]	3.5 [s]
TRK	Medición de seguimiento	10[mm] + 1[ppm]	0.8 [s]/0.3 [s]

### Alcance Máximo:

1 prisma	6000 [m]
Máximo retorno de señal	14000 [m]

**Rango de temperatura:** -20 [°C] a +50[°C]

**Peso:** 1.7 [kg]

**Alimentación:** 12 [V] CD 2.2 [A] máx.

**Tipo de láser:** Láser externo GLZ1 de LEICA

**Interfases:** Rs232 2400 [baudios], 7 [bits], Paridad: par, 1 [bit] de paro, control de flujo ninguno

<sup>78</sup> Disponible en [www.rost.co.at/rn/daten/prospekte/rovi/Prospekt\\_DI3000\\_DIOR3002.pdf](http://www.rost.co.at/rn/daten/prospekte/rovi/Prospekt_DI3000_DIOR3002.pdf)



## ESPECIFICACIONES TECNICAS RADIOMODEMS RF115 BLACK BOX CORPORATION.

Tabla B-3 Especificaciones técnicas Industrial Modem RF 115<sup>79</sup>.

Modelo	Industrial MODEM RF115
Rango	32.2 [km] (20 millas)
Transmisión de datos (sin comprimir) protocolo RS-232	Desde 1200 baudios a 115.2 kbaudios (unidireccional) o 57.6 kbaudios (bidireccional).
Interfase RS232	Asíncrona, unidireccional o bidireccional.
Ganancia del sistema	135 [dB].
Nivel mínimo de decodificación del receptor	-110 [dBm] @ 10 <sup>-4</sup> [raw BER]; -108 [dBm] @ 10 <sup>-6</sup> [raw BER].
Tipo de modulación	Espectro disperso (Spread Spectrum), GFSK.
Código de Dispersión	Salto 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 fabrica
Modos de operación	Punto a punto, punto a múltiple, repetidor.
Condiciones de Operación	De -40[°C] a +75[°C] (-40[°F] a +167[°F]).
Clave FCC	KNY-DGR-115
Clave DOC (Canadá)	229 101 340 A
Dimensiones	6.4 x 19.1 x 28.7 x [cm] (2.5"H x 7.5"W x 11.3"D)
Peso	2 [kg] (4.5 [lb] )

<sup>79</sup> Black Box Corporation, "Manual de usuario Industrial Modem RF115", Págs. 6-7

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS MESAS ROTARIAS M-495CC<sup>80</sup>.

Tabla B-4 Detalles del diseño de las mesas rotatorias M-495CC.

Material	Acero inoxidable con cuerpo de aluminio
Rodamientos	De rodillos cilíndricos
Peso	2 [kg]
Relación de transmisión	1:180
Retroalimentación (sensores de posición)	Encoder incremental montando directamente de 2000 [pts/rev]
Interruptores de límite	Ópticos a +/- 170° se pueden inhabilitar para proporcionar una rotación de 360° continuos.
Origen	Óptico
Motor	Servo motor de DC modelo UE31CC

Tabla B-5 Especificaciones Mecánicas de las mesas rotatorias M-495CC.

Rango de rotación	360°
Resolución	0.001°
Sensibilidad	0.003°
Repetibilidad (unidireccional)	0.006°
Histéresis	0.015°
Repetibilidad al origen	0.002°
Exactitud (absoluta)	0.05°
Velocidad máxima	2.5 [°/s]
Carga normal máxima	250 [N]
Balaceo	150[μrad]
Carga normal máxima (Cz.)	250 [ N ]
Torque Nominal (Mz)	1.8 [N.m]
Rigidez transversal (kα)	20 [μrad/N.m]
D es la distancia del voladizo	en [mm]
Carga máxima en voladizo (Q)	$Q \leq \frac{C_z}{(1 + D/44)}$

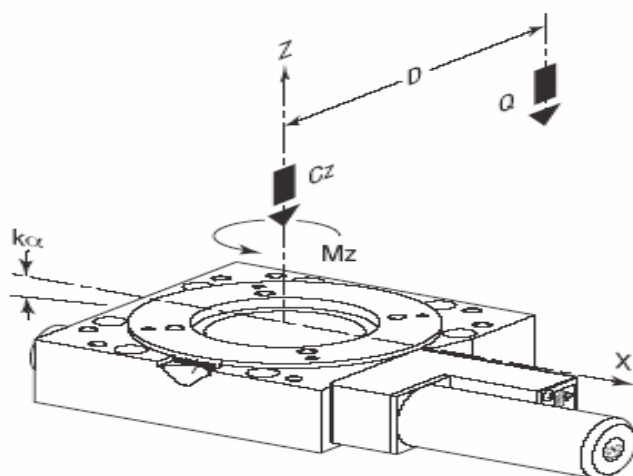


Fig. B-1 Características de carga y rigidez.

<sup>80</sup> NEWPORT, "Manual de Usuario M-495CC", Págs.2-4.

## APÉNDICE C DIAGRAMAS DE FLUJO.

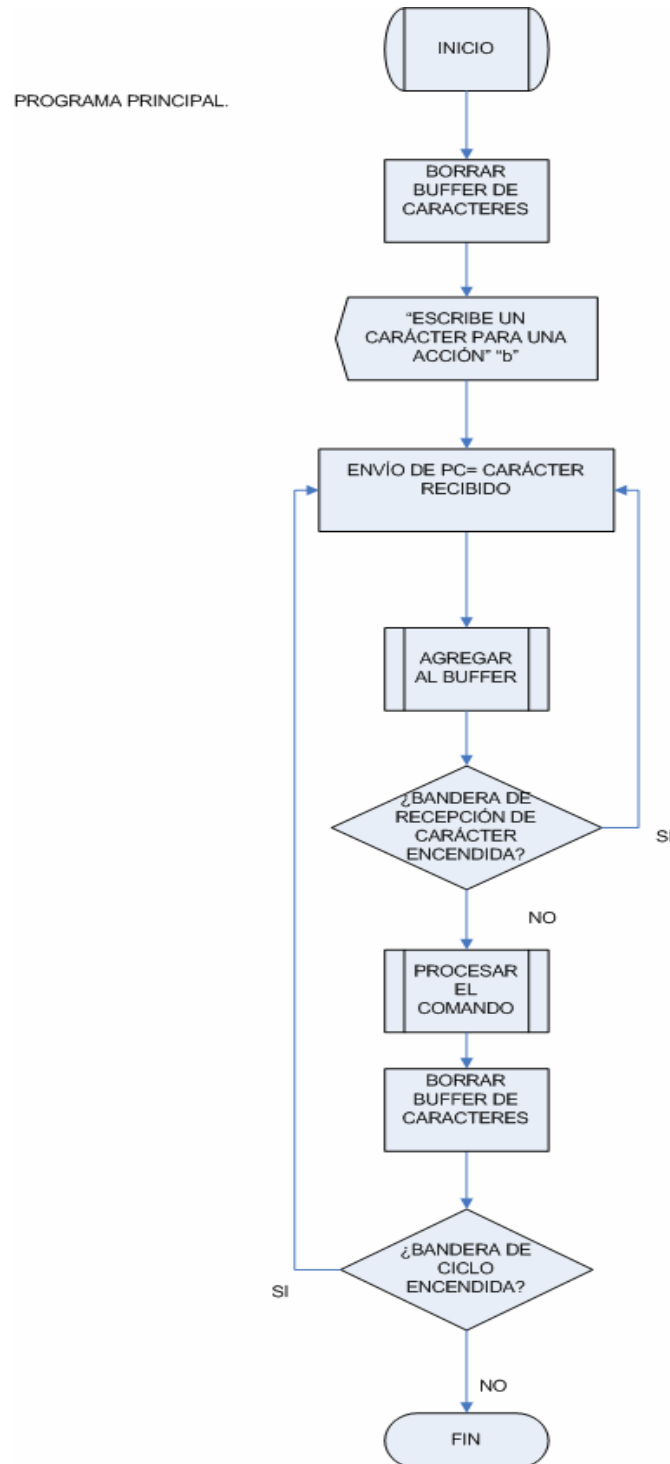


Figura C-1 Diagrama de flujo de la función principal del programa del PIC.<sup>81</sup>

<sup>81</sup> Los autores.

DIAGRAMA DE FLUJO  
DE LA FUNCIÓN  
AGREGAR AL BUFFER.

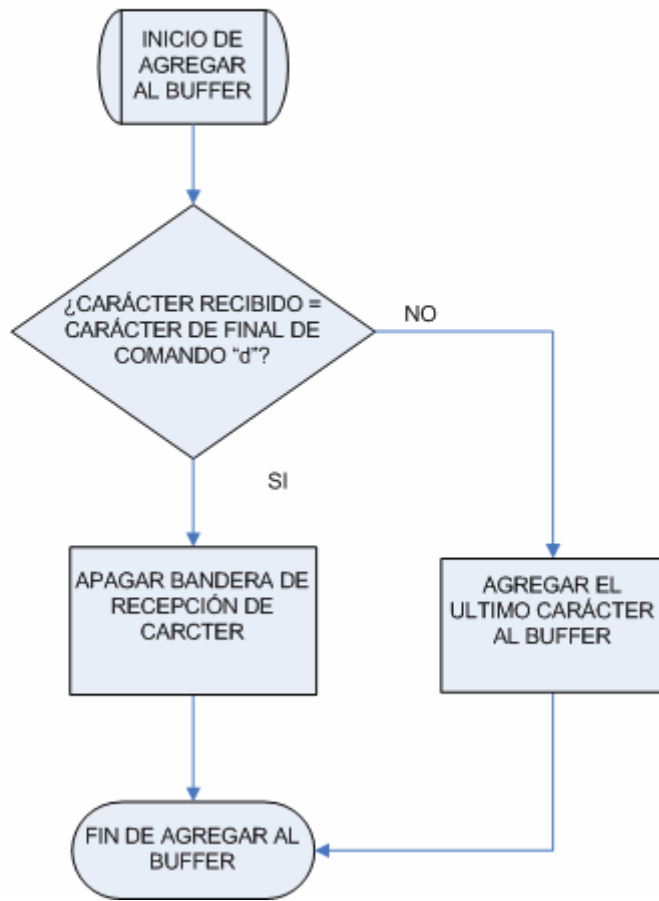


Figura C-2 Diagrama de flujo de la función agregar al buffer.<sup>82</sup>

---

<sup>82</sup> Los autores.

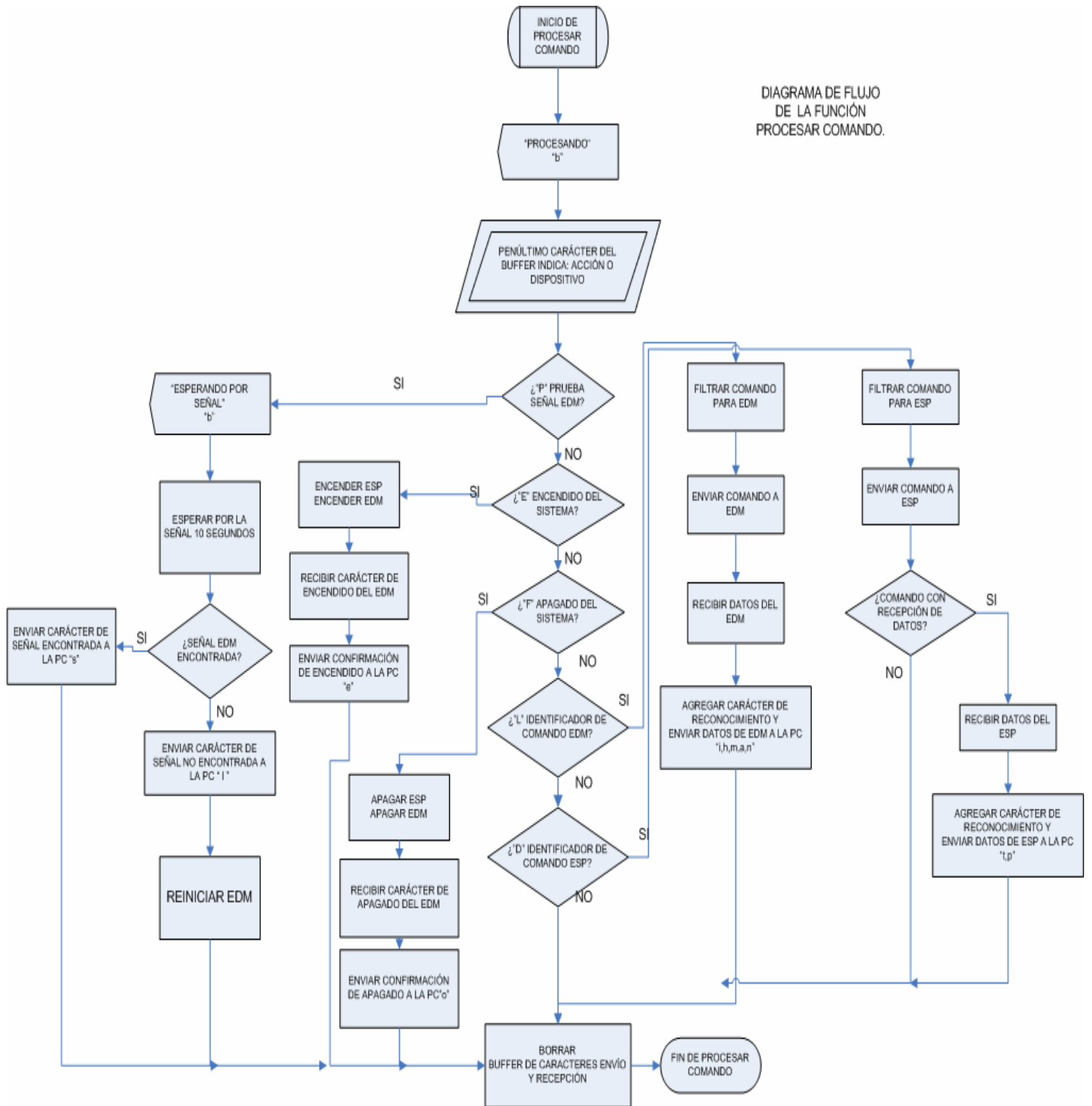


Figura C-3 Diagrama de flujo de la función procesa comando.<sup>83</sup>

<sup>83</sup> Los autores.

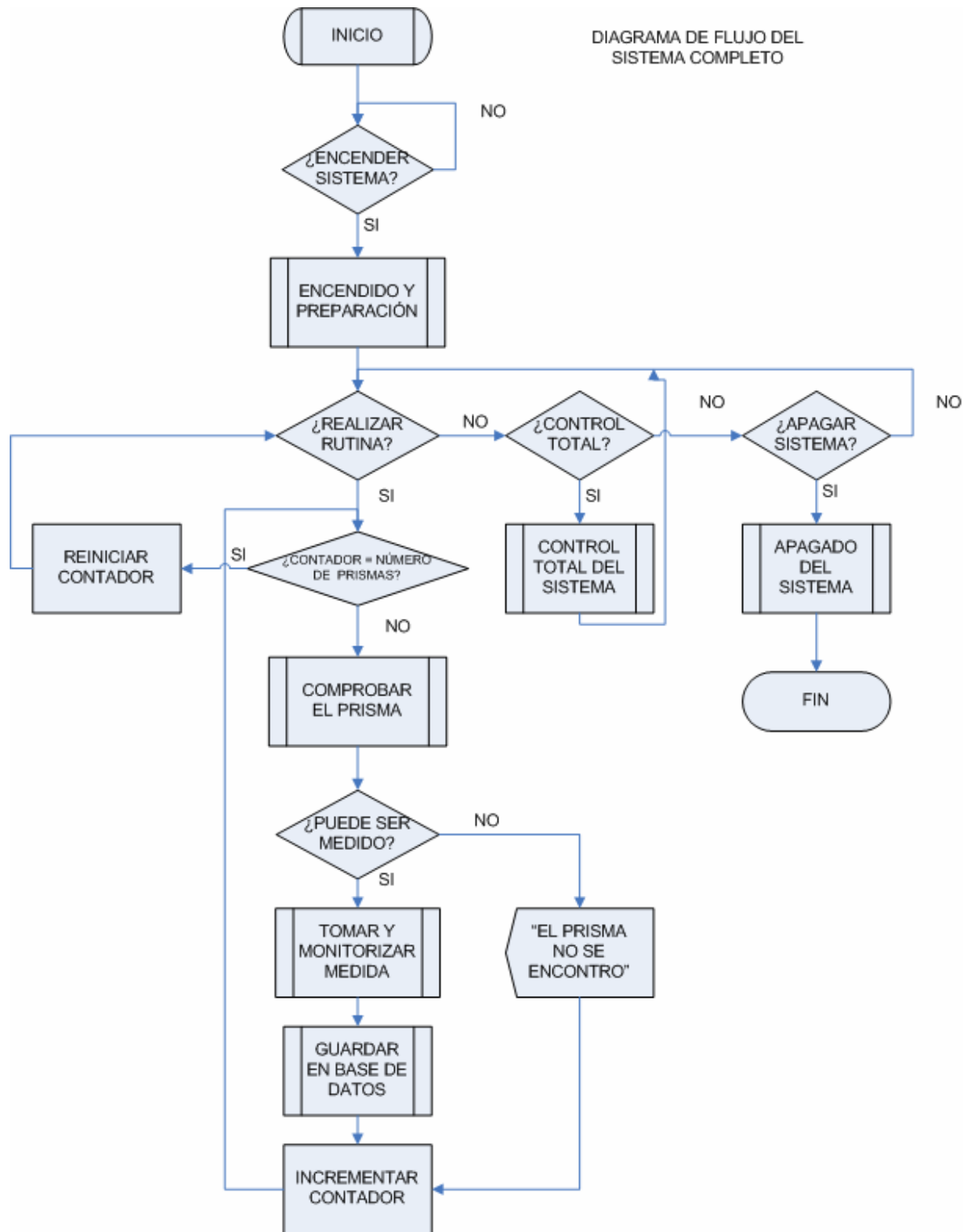


Figura C-4 Diagrama de flujo para el programa en Visual Basic.<sup>84</sup>

<sup>84</sup> Los autores.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

NEWPORT, "Manual de Usuario ESP300 Motion Controller/Driver".

NEWPORT, "Manual de Usuario M-495CC".

Piña Paton Benjamín, "Evolución en la captura y el tratamiento de la información geográfica con fines cartográficos", Revista Internacional de Ciencias de la Tierra MAPPINGINTERACTIVO, Julio de 1999.

Campbell Joe, "El libro del RS-232" 2ª Edición Madrid, España-Anaya Multimedia.

Uyless Black, "Redes de Computadores Protocolos Normas e Interfaces", 2ª Edición, México, Editorial Computec Ra-Ma Alfaomega.

Martín Cuenca Eugenio, Angulo Usategi José María, Angulo Martínez Ignacio "Microcontroladores PIC la solución en un chip", Editorial Paraninfo, México 1998.

Quas Weppen, Valdés Gonzáles, Guevara Ortiz, E. Ramos, De la Cruz Reyna; "Monitoreo volcánico: Instrumentación y Métodos de Vigilancia", Documento 8613 México, D.F., Julio 1995 Disponible en:  
[http://www.crid.or.cr/crid/CD\\_Alerta\\_Temprana/pdf/spa/doc8613/doc8613.htm](http://www.crid.or.cr/crid/CD_Alerta_Temprana/pdf/spa/doc8613/doc8613.htm)

Macías Vázquez José Luís, Instituto De Geofísica, UNAM; Capra Pedol Lucia, Instituto De Geografía, UNAM; "El Peligro Volcánico en México"; Disponible en:  
[http://www.geofisica.unam.mx/vulcanologia/volcanes/peligro\\_volcanico.html](http://www.geofisica.unam.mx/vulcanologia/volcanes/peligro_volcanico.html)

Araña Saavedra Vicente, "Volcanismo Dinámica y Petrología de sus Productos", Editorial Istmo, Madrid España.

Astiz Mar, García Alicia, Ortiz Ramón, "Instrumentación en Volcanología"  
Disponible en: [www.icoddelosvinos.com/volcan/download/](http://www.icoddelosvinos.com/volcan/download/)

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

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

Errasti O.U., Juarez G.J.A., Huerta R.M.A., "Diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo cuasi real"; Tesis de licenciatura Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2000.

Gómez Vázquez, Ángel, "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. México D.F. 2000.

Errasti O.U., "Diseño de un sistema automatizado de segunda generación para el monitoreo continuo de deformaciones volcánicas"; Tesis de maestría Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2006.

Tilling I. Robert, "Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos", publicado por Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, Santa Fe Nuevo México, USA 1989.

Iwatsubo, Eugene Y; Swanson, Donald A." Métodos usados para vigilar la deformación del piso del cráter y del domo de lava en el Mount St. Helens, Washington.", Washington, USA; 1993.

Perry G, "Aprendiendo Visual Basic 6 en 24 horas". Prentice Hall Pearson México, 1998.