

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



# **Desarrollo de un Sistema de Monitoreo Volcánico**

PRESENTADO POR:

**LEONEL AMÍLCAR LÓPEZ MENDOZA  
SALVADOR OSWALDO MOLINA ARÉVALO  
RENÉ ALEXANDER VÍDES RAMÍREZ**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2007

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTORA

:

**DRA. MARÍA ISABEL RODRÍGUEZ**

SECRETARIA GENERAL :

**LICDA. ALICIA MARGARITA RIVAS DE RECINOS**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO

:

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO

:

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA**

DIRECTOR

:

**ING. LUÍS ROBERTO CHÉVEZ PAZ**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título :

**Desarrollo de un Sistema de Monitoreo  
Volcánico**

Presentado por :

**LEONEL AMÍLCAR LÓPEZ MENDOZA  
SALVADOR OSWALDO MOLINA ARÉVALO  
RENÉ ALEXANDER VÍDES RAMÍREZ**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director :

**ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE**

San Salvador, Julio de 2007

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a Dios por iluminarme durante los años de recorrido en mi carrera que por fin culmino. Por haberme brindado sabiduría para tomar las decisiones adecuadas en los momentos de duda.

A mi santa madre Aurora Isolina Mendoza Manzano de López quien ha sido mi apoyo incondicional a lo largo de mi carrera, en los logros y en los tropiezos. Gracias madre, este logro es tanto suyo como mío.

Agradezco de forma infinita a mis hermanos Oscar José Arnulfo López Mendoza y Marco Ricardo López Mendoza. Gracias a su apoyo y ayuda incomparable he logrado obtener fuerzas en aquellos momentos difíciles en los cuales no existía claridad y que por momentos hubo tropiezos que me desanimaban e impedían pensar claramente.

A mis profesores docentes quienes me han brindado sus conocimientos y experiencias además de su apoyo en los momentos que la incertidumbre y las dudas gobernaban mis pensamientos y no encontraba respuestas claras a mis problemas académicos.

Gracias a todos los compañeros con quienes compartimos en una ó en más ocasiones el aula ó grupo de trabajo en todas las materias cursadas, ya que sin su apoyo, ayuda y contribución, hubiera sido casi imposible avanzar en la carrera y terminar a tiempo todas aquellas tareas que entregamos al filo de la hora.

A todos mis compañeros, especialmente a aquellos con los que formamos grupos de estudio; Manuel Portillo, Eduar Barillas, Yimi Gallegos, Salvador Molina, Osbaldo Cáceres, Ronald De la Cruz, Yancy Carina, Luis León, Vídes Ramírez y todos aquellos que durante el tiempo que estuve estudiando compartimos algunos momentos pero que por uno u otro motivo no lograron terminar y dejaron su carrera a medio camino.

De forma especial agradezco a mis compañeros de Tesis Salvador Oswaldo Molina Arévalo y René Alexander Vídes Ramírez que depositaron su confianza en mí para formar parte de su grupo y respetaron mis decisiones a la vez que confiaron en todo momento en mis criterios personales para todas las actividades y trabajos de los cuales me responsabilizaba.

**LEONEL AMÍLCAR LÓPEZ MENDOZA**

Agradezco a mi Dios todo poderoso por haberme dado inteligencia y sabiduría en todo momento de la carrera, gracias porque nunca me deja solo en los momentos mas difíciles.

Agradezco a mi familia Rogelio Salvador Molina Díaz, Morena Guadalupe Arévalo de Molina, Tatiana Guadalupe Molina Arévalo y Jonathan Iván Molina Arévalo quienes fueron mis pilares principales y mi principal motivo para terminar este camino, gracias por sus consejos y ejemplos de vida.

A mis hermanos de la Comunidad Católica Jesucristo por sus oraciones y a mi Novia por su comprensión y ayuda durante mis estudios.

*En mi angustia llame al Señor;  
el me escucho y me dio libertad.  
El Señor esta conmigo; no tengo miedo.  
El Señor esta conmigo; el me ayuda.  
Es mejor confiar en el Señor  
que confiar en el hombre.  
Es mejor confiar en el Señor  
que confiar en grandes hombres.  
Te doy gracias, Señor, porque me has respondido  
y porque eres mi salvador.  
La piedra que los constructores despreciaron  
se ha convertido en la piedra principal.  
Esto lo ha hecho el Señor,  
y estamos maravillados.  
Este es el día en que el Señor ha actuado:  
¡Estemos hoy contentos y felices!  
Por favor, Señor, ¡sálvanos!  
Por favor, Señor, ¡haz que nos vaya bien!*

*Salmo 118.*

**Salvador Oswaldo Molina Arévalo.**

En primer lugar, agradezco a Dios, ese ser desconocido que mi conocimiento no comprende aun en su totalidad, cuya fuerza y apoyo sentí muchas veces dentro de mi interior mas aún, en los momentos de desánimo, en esos momentos donde sentí encontrarme sin esperanza y sin apoyo en esta vida, donde sentí que era muy difícil continuar.

Agradezco a mis padres, Jaime Vides y Juana Silvia Ramírez de Vides, quienes han sido un apoyo incondicional durante mi vida y mis estudios universitarios; por siempre haberme enseñado lo correcto; por corregirme en las situaciones erróneas, y por todo ese bello tesoro invaluable que me han entregado: su amor y sus conocimientos.

Agradezco a mi hermano, Jaime Ernesto Vides Ramírez, por haberme apoyado durante mi carrera universitaria, por sus consejos y por el cariño que me ha demostrado desde siempre.

A mis amigos, tesoros inigualables que Dios ha colocado en mi camino, quienes han estado conmigo en los momentos difíciles y en quienes he confiado mis problemas; aquellos que me han dado aliento para continuar siempre adelante.

A mis compañeros de estudio, con quienes pase momentos inolvidables en la universidad, con quienes estude y me brindaron su ayuda académica en los momentos que los necesite.

RENE ALEXANDER VIDES RAMIREZ

## INDICE DE CONTENIDOS

Capítulo	Página
<b>I. VULCANOLOGIA A NIVEL MUNDIAL Y SU EVOLUCION EN EL SALVADOR.</b>	<b>1</b>
1.1 DESARROLLO DE LA VULCANOLOGIA A NIVEL MUNDIAL	2
1.1.1 Técnicas actuales de monitoreo	2
1.1.1.1 Vigilancia visual	3
1.1.1.2 Medición de Actividades Sísmicas	3
1.1.1.3 Monitoreo Geodésico	3
1.1.1.4 Monitoreo Geoquímico (Muestreo de gases)	3
1.1.1.5 Medición de temperaturas	4
1.2 AMENAZA LATENTE EN EL VOLCAN DE SAN SALVADOR	6
1.2.1 Eventos anteriores en el volcán de San Salvador	6
1.2.2 Actividad reciente en el volcán de San Salvador	6
1.2.3 Actividad futura en el volcán de San Salvador	7
1.2.4 Monitoreo volcánico en El Salvador	7
1.3 DESARROLLO DE LA VULCANOLOGIA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR	8
1.3.1 Participación de la universidad de el salvador en la vulcanología	8
1.3.2 Resultados del trabajo realizado por el GIV-UES	8
<b>II. TEORIA DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO</b>	<b>10</b>
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2.2 JUSTIFICACION	12
2.3 TEORIA SOBRE EQUIPOS DE MEDICIÓN VULCANOLÓGÍA	13
2.3.1 Medida de gases volcánicos	13
2.3.2 Análisis de gases	13
2.3.2.1 Toma de muestras	14
2.3.2.2 Cromatografía	14
2.3.2.3 Espectrógrafo de masas	14
2.3.2.4 Métodos espectrométricos	15
2.3.2.4.1 El sensor de CO <sub>2</sub>	15
2.3.2.4.2 Funcionamiento del sensor	16
2.3.2.4.3 Método de la cámara de acumulación	17
2.3.2.4.4 Calculo de la concentración de CO <sub>2</sub>	17
23245 Consideraciones sobre la medida de CO <sub>2</sub>	20
2.3.3 Medida de temperaturas	21
2.3.3.1 Sensores de temperatura	22
2.3.3.2 Termómetros de termopar	23
2.3.3.3 Termómetro de semiconductor	24
2.3.4 Medida de potencial espontáneo	25
2.3.4.1 Variaciones de potencial	25



2.3.4.2	Sistema electrónico	25
2.3.5	Medición de la sismicidad	26
2.3.5.1	Geófonos	27
2.3.5.2	El geófono electromagnético	28
2.3.5.3	Equivalente eléctrico del geófono electromagnético	29
2.4	PROPUESTA DE SOLUCION	32
2.4.1	Etapa de sensores	32
2.4.2	Etapa amplificadora	33
2.4.3	Etapa de desplazamiento de señales	33
2.4.4	Etapa de adquisición y procesamiento de datos	34
2.4.5	Diagrama a bloques del sistema de monitoreo completo	34
2.5	TELEMETRIA	35
2.5.1	Transmisión por radio VHF/UHF	36
2.5.2	Transmisión por WI-FI	36
2.5.2.1	Redes WLAN	37
2.5.2.2	Aplicaciones de los sistemas WLAN	38
2.5.2.3	Configuraciones WLAN	38
2.5.2.3.1	Punto a punto o Peer-to-peer	38
2.5.2.3.2	Enlace entre varias LAN o WMAN	39
2.5.2.4	Dispositivos de interconexión	39
<b>III. ESTACIÓN MULTIPARAMÉTRICA. DISEÑO PROPUESTO</b>		<b>41</b>
3.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA PROPUESTO	42
3.2	SENSORES	42
3.2.1	Termocuplas tipo K	42
3.2.2	Sensor de Temperatura TMP37	43
3.2.3	Geófono	43
3.2.4	Potencial de tierra	44
3.2.5	Sensor de CO <sub>2</sub>	44
3.3	CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE DATOS	45
3.3.1	Acoplamiento de señales	45
3.3.1.1	Acoplamiento de las Termocuplas tipo K	46
3.3.1.2	Acoplamiento del sensor de temperatura TMP37	50
3.3.1.3	Acoplamiento del geófono Mark L28 de 4.5 Hz	51
3.3.1.4	Acoplamiento de la señal de CO <sub>2</sub>	52
3.3.1.4.1	Cámara de acumulación de CO <sub>2</sub>	53
3.3.1.5	Acoplamiento de la señal de potencial de tierra	55
3.3.2	Procesamiento de datos	57
3.3.2.1	Software para el procesamiento de las señales Eléctricas de los sensores	58
3.3.2.2	Registros de control	61
3.3.2.2.1	Registro CONTROL_1	61
3.3.2.2.1.1	BIT 0 (LGEO)	61
3.3.2.2.1.2	BIT 1 (TXGEO)	62
3.3.2.2.1.3	BIT 2 (LTP)	62
3.3.2.2.1.4	BIT 3 (TXTP)	22

3.3.2.2.1.5 BIT 4 (LCO <sub>2</sub> )	63
3.3.2.2.1.6 BIT 5 (TXCO <sub>2</sub> )	63
3.3.2.2.1.7 BIT 6 (MENU)	64
3.3.2.2.1.7.1 Probar Sistema	64
3.3.2.2.1.7.2 Enviar Datos en Memoria	64
3.3.2.2.1.7.3 Limpiar datos en Memoria	65
3.3.2.2.1.8 BIT 7 (INRX)	65
3.2.2.2 Registro CONTROL_2	65
3.3.2.2.2.1 BIT 0 (BAJAR)	66
3.3.2.2.2.2 BIT 1 (POS)	66
3.3.2.2.2.3 BIT 2 (TD)	66
3.3.2.2.2.4 BIT 3 (-)	66
3.3.2.2.2.5 BIT 4 (BANCO)	66
3.3.2.2.2.6 BIT 5 (-)	66
3.3.2.2.2.7 BIT 6 (SUBIR)	67
3.3.2.2.2.8 BIT 7 (HECHO)	67
3.4 MODULOS DE RF (Wi-Fi)	68
3.4.1 Elementos de la red WLAN	68
3.4.1.1 Estación procesadora central	68
3.4.1.2 Estación multiparametrica	68
3.4.1.3 Enlace inalámbrico para la WLAN	69
3.5 ESTACION PROCESADORA CENTRAL	70
3.5.1 Panel frontal	70
3.5.2 Diagrama de bloques general del programa de monitoreo	71
3.5.2.1 Configuración del puerto serial	72
3.5.2.2 Escritura de datos hacia el circuito	72
3.5.2.3 Lectura de datos medidos por el circuito	73
3.5.2.4 Decodificación y presentación de los datos medidos	74
3.5.3 Uso de SUBVI'S	76
3.5.3.1 SUBVI HORA	76
3.5.3.2 SUBVI TEMP-POT	77
3.5.3.3 SUBVI CO <sub>2</sub>	78
3.5.3.4 SUBVI GEO	79
3.5.3.5 SUBVI SLOPE	80
3.5.3.6 SUBVI EXCEL	81
3.6 CONCLUSIONES	82

#### **IV. PRUEBAS DE CAMPO. MEDICIONES EN EL VOLCAN DE SANTA ANA** **83**

4.1 DESCRIPCION FUNCIONAL DEL EQUIPO	84
4.1.1 Análisis de carga eléctrica	84
4.1.2 Pruebas de laboratorio	85
4.1.3 Configuración básica	87
4.1.3.1 Configuración en la estación procesadora central	87
4.1.3.2 Configuración en la estación multiparametrica	87
4.1.4 Análisis de radioenlace	88

4.1.4.1 Principales magnitudes que intervienen en el radioenlace	88
4.1.4.1.1 Potencia transmitida	88
4.1.4.1.2 Ganancias de las antenas transmisora y receptora	89
4.1.4.1.3 Perdidas básicas de propagación en espacio libre	89
4.1.4.1.4 perdidas adicionales de propagación	89
4.1.4.1.5 Perdidas por lluvia	89
4.1.4.1.6 Perdidas por niebla	91
4.1.4.1.7 Perdidas por vegetación	91
4.1.4.2 Calculo del radioenlace	91
4.1.4.2.1 Resultados teóricos del enlace	93
4.1.4.2.2 Calculo automatizado del radioenlace	93
4.2 PRUEBAS DE CAMPO	96
4.2.1 Descripción del entorno	96
4.2.2 Instalación de sensores y estación multiparametrica	96
4.2.3 Instalación de modulo de radio	98
4.2.4 Enlace remoto	100
4.3 RESULTADOS OBTENIDOS	100
4.4 ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL EQUIPO	104
4.5 COMPARACION CON SISTEMAS DE TIPO COMERCIAL	107
4.5.1 Descripción general	107
4.5.2 Datos generados por la estación comercial	109
4.6 CONCLUSIONES	111

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
<b>CAPITULO I:</b>	
1.1 Gases volcánicos	4
<b>CAPITULO II:</b>	
2.1 Aplicación del cromatógrafo	14
2.2 Fundamento de un sensor de CO <sub>2</sub>	16
2.3 Cámara de acumulación utilizada para leer la concentración de CO <sub>2</sub>	17
2.4 Curva de concentración de CO <sub>2</sub>	18
2.5 Curva de concentración de CO <sub>2</sub> en el aire y CO <sub>2</sub> en el suelo	18
2.6 Regresión lineal del segmento de la curva de flujo	19
2.7 Convección ablación	21
2.8 El LM35	24
2.9 El estudio de las variaciones de potencial	25
2.10 Amplificador diferencial para el estudio de variaciones de potencial espontáneo	26
2.11 Los sensores utilizados en sismología se clasifican de acuerdo con la banda de frecuencias cubiertas	28
2.12 Principio de un sensor sísmico vertical	28
2.13 Principio de un geófono electromagnético	29
2.14 La analogía entre el sistema de ecuaciones del movimiento de la masa del sensor, con sus equivalentes del circuito eléctrico	30
2.15 Diseño del sistema de monitoreo	32
2.16 Efecto de la amplificación en una señal	33
2.17 Desplazamientos de señal	34
2.18 Diagrama a bloques del sistema de monitoreo como propuesta de solución	34
2.19 Configuración ad-hoc	39
2.20 Enlace entre varias LAN	39
<b>CAPITULO III:</b>	
3.1 Diagrama de bloques general	42
3.2 Termocuplas utilizadas para medir la temperatura del suelo	43
3.3 Sensor de temperatura TMP37	43
3.4 Geófono Mark L28	44
3.5 Electrodo usado para medir el potencial de tierra	44
3.6 Cámara de acumulación y medidor de CO <sub>2</sub>	45
3.7 Circuito Básico Compensatorio con AD595 para Termocuplas tipo K	46
3.8 Gráfica de voltaje de salida del AD595 vs. Temperatura de la termocupla	47
3.9 Diagrama Interno del OP-AMP AD623	48
3.10 Circuito Final Acoplador para las Termocuplas tipo K	49
3.11 Sensor Lineal de Temperatura TMP37	50
3.12 Grafica de la relación entre voltajes de salida real e ideal del TMP37	51
3.13 Circuito de filtrado y amplificación para la señal del Geófono	52

3.15	Primer diseño de la cámara de acumulación de CO <sub>2</sub>	53
3.16	Diseño final de la cámara de acumulación	54
3.17	Etapa de potencia del motor	55
3.18	Etapa de potencia de la Bomba	55
3.19	Circuito medidor del potencial espontáneo ó potencial de Tierra	56
3.20	Conexión de cada sensor con los pines de lectura del PIC	57
3.21	Secuencia del procesamiento y transmisión de datos muestreados	58
3.22	Distribución de los datos adquiridos desde los sensores en la memoria.	59
3.23	Flujograma del programa del microcontrolador	60
3.24	Registro de control 1	61
3.25	Formato de la trama de datos del geófono.	62
3.26	Formato de la trama de los datos de temperatura y potencial.	62
3.27	Trama de datos de CO <sub>2</sub> enviada a la PC.	64
3.28	Registro de control 2	65
3.29	Estación procesadora central	68
3.30	Estación multiparametrica	69
3.31	Enlace WLAN	69
3.32	Panel de control diseñado para el monitoreo volcánico	70
3.33	Diagrama de bloques del programa en Lab View	71
3.34	Configuración del puerto serial.	72
3.35	Etapa de escritura sincronizada por la hora del sistema	73
3.36	Etapa de escritura manual	73
3.37	Etapa de lectura de datos	74
3.38	Etapa de decodificación y presentación de datos de temperatura y potencial	75
3.39	Etapa de decodificación y presentación de los datos medidos de CO <sub>2</sub>	75
3.40	Etapa de decodificación y presentación de los datos medidos del Geófono	76
3.41	SUBVI HORA	77
3.42	SUBVI TEMP-POT	78
3.43	SUBVI CO <sub>2</sub>	78
3.44	SUBVI GEO	79
3.45	SUBVI SLOPE	80
3.46	SUBVI EXCEL	81

#### **CAPITULO IV:**

4.1	Esquema de conexión de mangueras, motor, bomba y switch	86
4.2	Esquema de conexión de sensores de temperatura y potencial	86
4.3	Conectores para la alimentación de módulos RF	86
4.4	Atenuación por unidad de longitud en función de la frecuencia y la polarización	93
4.5	Ubicación de los 2 puntos en Radio Mobile	94
4.6	Perfil del radioenlace	95
4.7	Valores teórico y calculado	95
4.8	Montaje de sensores y estación multiparametrica.	97
4.9	Ubicación de los puntos de enlace.	98
4.10	Diagrama de conexión entre antena, amplificador y AP en la estación multiparametrica.	99
4.11	Diagrama de conexión entre antena, amplificador y AP en la estación procesadora central.	99

4.12 Cable coaxial utilizado para conectar los módulos de radioenlace	100
4.13 Datos mostrados durante medición de CO <sub>2</sub>	101
4.14. Momento en el cual solo se esta midiendo la señal del Geófono	102
4.15 Registro histórico en el archivo Excel DATOS MEDIDOS.xls	103
4.16 Vista superior de Estación multiparametrica	104
4.17 Indicadores de estado o proceso	104
4.18 Cámara de acumulación	106
4.19 Módulos de medición	107
4.20 Conectores RS232 y CO <sub>2</sub>	108
4.21 Modulo de Bluetooth	108
4.22 Diseño de la cámara de acumulación de CO <sub>2</sub>	109
4.23 Ventana principal de software	109
4.24 Forma grafica de mostrar resultados	110

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
<b>CAPITULO II:</b>	
2.1 Familias de Termómetros.	22
2.2 Características de los termopares	23
2.3 Tipos de transmisión de datos que se utilizan hoy en día	35
<b>CAPITULO III:</b>	
3.1 Medición de voltaje de salida de la termocupla vs voltaje del AD595	47
3.2 Resultados obtenidos con el circuito de de acople para las Termocuplas tipo K	49
3.3 Medición de voltaje a la salida de TMP37	50
3.4 Procesos que se pueden activar remotamente desde la PC	65

## PREFACIO

A través del tiempo, el ser humano ha visto la necesidad de predecir con anticipación todos aquellos eventos naturales que pudiesen poner en peligro la integridad física de las personas e instalaciones, entre estos están las erupciones volcánicas. A medida que la tecnología avanza, se han diseñado diversos métodos de monitoreo que generalmente consisten en medir continuamente los parámetros físicos necesarios para determinar la posible ocurrencia de una erupción.

El Salvador, al igual que otros países del continente americano, forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, región que consiste en una cadena de volcanes activos que da origen a dos diferentes fenómenos físicos: por una parte una intensa actividad sísmica y por otra la fusión de rocas de la corteza terrestre sometidas a altas temperaturas y presiones. El magma, resultado de la fusión de las rocas, asciende a través de fracturas por la Placa del Caribe hasta alcanzar la superficie, donde se producen las erupciones volcánicas y la formación de los conos volcánicos.

En nuestro país, el SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) es el organismo encargado de realizar diferentes estudios geofísicos, geoquímicos y vulcanológicos y por lo tanto de monitorear continuamente las actividades sísmicas y vulcanológicas que le permitan pronosticar anticipadamente una erupción. De igual manera, el Instituto de Ciencias de la Tierra en la Universidad de El Salvador cuenta con dos programas activos de monitoreo de fenómenos que pueden dar indicios de anomalías y así proceder a la prevención de desastres. Estos son: El programa de monitoreo geoquímico y el programa de monitoreo geofísico, en ambos se realizan monitoreos o mediciones continuas y discretas de los diferentes parámetros.

En base a lo anterior, se planteó el siguiente trabajo de graduación el cual consiste en el diseño de un sistema de monitoreo vulcanológico a través de una red WI-FI, que permite monitorear seis parámetros físicos en tiempo real y de forma frecuente a través de una computadora instalada en un punto remoto. Este sistema consta básicamente de dos partes: el hardware que lo componen los circuitos, sensores, amplificadores entre otros; y el software que se divide en dos partes; Un software de aplicación diseñado en LabView y el programa del microcontrolador utilizado.



## RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño un prototipo para una estación multiparamétrica que permita monitorear en forma continua y eficaz los diferentes parámetros vulcanológicos de interés. En base a esto, el trabajo se ha estructurado de la siguiente manera: Generalidades de los sistemas de monitoreo actuales en el país, explicación de los métodos comunes para medir los parámetros geofísicos, desarrollo técnico del sistema tanto en hardware como del software y el análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

El primer capítulo presenta una panorámica general de los sistemas de monitoreo con los que cuenta actualmente nuestro país. El segundo capítulo explica más detalladamente algunos métodos e instrumentos que pueden ser utilizados para el monitoreo de algunos parámetros geofísicos tales como el CO<sub>2</sub>, potencial de tierra entre otros.

El tercer capítulo consiste en una explicación detallada del hardware y software diseñado. La información de este capítulo incluye los sensores utilizados, los circuitos de acoplamiento para cada sensor, la etapa de adquisición de datos y la teoría de radioenlace.

Finalmente en el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos tanto en el laboratorio así como en las pruebas de campo. Estos son comparados con los sistemas con los que cuenta actualmente la Universidad de El Salvador y se emiten las recomendaciones que pudiesen mejorar el prototipo diseñado.

La información complementaria a los capítulos se presenta en los apéndices. Esta información incluye la configuración de los diferentes dispositivos utilizados para la transmisión y recepción de datos, flujogramas de cada proceso y subproceso del programa del microcontrolador y las especificaciones técnicas de los sensores y circuitos integrados utilizados.

## **CAPITULO I**

### **VULCANOLOGIA A NIVEL MUNDIAL Y SU EVOLUCION EN EL SALVADOR**

#### **INTRODUCCION**

Durante muchos siglos atrás el hombre siempre ha deseado predecir los fenómenos naturales que afectan sus actividades cotidianas, entre éstas las erupciones volcánicas.

En 1912, Thomas Jaggard del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) estableció el primer observatorio vulcanológico en Estados Unidos exactamente en Hawai. Durante el resto del siglo XX, estos observatorios fueron expandiéndose a través de todas las regiones con volcanes activos. A lo largo de este período, los conocimientos de expertos en la materia se han compartido a través de congresos internacionales de los cuales como resultado se originó en 1981 la Organización Mundial de Observatorios de Volcanes, la cual tiene como finalidad promover la comunicación entre los distintos observatorios del mundo.

En El Salvador existe una intensa actividad sísmica debido a que se encuentra ubicado en la región conocida como el Cinturón de Fuego del Pacífico. El Salvador posee una cordillera volcánica debido a que un 90% del subsuelo está formado por materiales volcánicos. Esto nos lleva a pensar sin lugar a dudas que existe un peligro latente para las ciudades ubicadas geográficamente en los alrededores de los volcanes que se encuentran en actividad hoy en día. Prueba de ello fueron los eventos ocurridos en el volcán Ilimatepec de Santa Ana en el año 2001. Con el fin de poder prevenir un desastre que cobre vidas humanas es necesario hacer un esfuerzo por predecir cualquier evento que implique un peligro inminente a la población monitoreando el comportamiento de los volcanes activos en el país.

El volcán de San Salvador que posee un volumen de aproximadamente  $110 \text{ km}^3$  es el de mayor interés para nosotros. El motivo de nuestro interés por éste volcán es que al estar ubicado en la capital del país que tiene una población aproximada de 2 millones de habitantes y una densidad poblacional de aproximadamente 2100 habitantes por kilómetro cuadrado es el que puede eventualmente provocar una catástrofe de grandes proporciones al hacer erupción o provocar un desprendimiento de tierra y escombros que pueden llevarse a su paso muchas de las regiones habitadas que hoy por hoy continúan asentándose cada vez más cerca de las faldas del volcán y sus proximidades.

## **1.1 DESARROLLO DE LA VULCANOLOGIA A NIVEL MUNDIAL**

El estudio de los fenómenos vulcanológicos es una ciencia bastante joven, sobre todo en países como el nuestro, sin embargo los científicos han comenzado a involucrarse en estos con apoyo logístico por parte de organismos internacionales en primera instancia hasta llegar al punto del desarrollo de la propia tecnología local.

### **1.1.1 TECNICAS ACTUALES DE MONITOREO**

La única manera de percibir y poder evaluar el estado de actividad en un volcán es a través de la observación y vigilancia sistemática mediante diversos métodos visuales e instrumentales. Si éstos se aplican en forma anticipada en las fases previas a un proceso eruptivo, es posible en la mayoría de los casos detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo de la actividad que incluso pudiese conducir a una predicción en el corto plazo de un proceso eruptivo inminente. Por estas razones es fundamental establecer sistemas de vigilancia y monitoreo en todos los volcanes potencialmente riesgosos del país con el fin de permitir el establecimiento de programas preventivos de acción frente a posibles desastres.

Los sistemas de monitoreo vulcanológico son diseñados para detectar y medir cambios de estado del volcán causado por el movimiento del magma que se encuentra debajo del volcán. Estos consisten en la observación continua y permanente por medio de una instrumentación especializada con la finalidad de detectar oportunamente alguna variación importante de su actividad y de ser posible anticipar alguna condición anómala precursora de un proceso eruptivo, para que a su vez con esta información se tomen medidas de seguridad o se ponga en marcha un plan de emergencia previamente establecido.

El aumento en el magma genera una cantidad de terremotos u otros tipos de eventos sísmicos y libera gases volcánicos desde el suelo o las fumarolas. Monitoreando éste fenómeno, los científicos son capaces de anticipar una erupción.

La vigilancia de un volcán es un proceso que implica necesariamente las siguientes actividades:

- Diseñar y establecer sistemas instrumentales y métodos de observación de acuerdo con las características y condiciones del volcán.
- Establecer una línea base ó niveles de referencia de ser posible cuando el volcán se encuentra en un estado de mínima actividad.
- Monitorear su actividad en forma continua y sistemática (llevar un registro de las observaciones).
- Reconocer oportunamente e interpretar cambios observados de su actividad respecto a los niveles de referencia establecidos.
- Establecer sistemas de alertamiento.
- Instrumentar e implantar un plan de emergencia enfocado a prevenir algún desastre y mitigar las posibles consecuencias derivadas de una erupción.

Entre las técnicas de monitoreo y vigilancia más importantes comúnmente utilizados en un volcán están; la vigilancia visual, el monitoreo sísmico, geodésico y geoquímico.

#### **1.1.1.1 Vigilancia Visual.**

Es la apreciación por medios visuales y mediante registro frecuente de las condiciones físicas del volcán, tales como emanación de gases y cenizas, deformaciones, derrumbes o deslaves, flujos de lodo, actividad magmática, ruidos o cualquier otra manifestación anómala que indica un cambio perceptible de su estado y actividad. Esta se lleva a cabo, entre otras, mediante observaciones a simple vista, con ayuda de binoculares, registros fotográficos o inclusive mediante sistemas de monitoreo con cámaras de video.

#### **1.1.1.2 Medición de Actividades Sísmicas.**

Medición local o remota de la actividad microsísmica y que permita localizar la fuente de energía e inferir la estructura interior del volcán así como cambios en la misma. Para ello se instalan usualmente redes sísmicas alrededor del volcán. Existe una gran variedad de éstos instrumentos dependiendo de su tecnología, medios de registro y respuesta de sus sensores. Generalmente se usan sismómetros y geófonos.

Para este caso, los vulcanólogos colocan sismómetros en diferentes puntos del volcán para determinar la ubicación y fuerza del sismo o terremoto. La señal medida por estos sensores es enviada por lo general vía radio frecuencia hacia un receptor en un punto lejano. Los sismómetros pueden detectar vibraciones superiores a los 2 Hz.

#### **1.1.1.3 Monitoreo Geodésico**

Básicamente es la medición de las deformaciones que el edificio volcánico sufre a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán. Consiste en la instalación de redes de estaciones monumentadas, puntos de observación e inclinómetros de diversos tipos. Las medidas pueden hacerse por métodos geodésicos convencionales (nivelación, triangulación, trilateración, inclinometría seca, etc.), por gravimetría y por otros métodos electrónicos como radio telemetría y mediante sistemas de posicionamiento global, GPS.

#### **1.1.1.4 Monitoreo Geoquímico (Muestreo de gases).**

Se refiere al análisis químico de concentrados y elementos en gases de fumarolas, manantiales, composición de cenizas, lavas y otros productos del volcán que son una manifestación de su actividad. Otras variables asociadas y que también son monitoreadas son vientos, temperatura, precipitación, pH y emanación de gas radón, entre otras. Las muestras de gases que se recopilan directamente de las fumarolas proveen información

adicional que permite establecer la situación interna del volcán. Por ejemplo, un aumento en la proporción de carbón y azufre puede ser usado para indicar el aumento en el magma. El análisis de los gases volcánicos es una de las técnicas más utilizadas para el monitoreo de la actividad volcánica. Los gases, por su extraordinaria difusividad, traen hasta la superficie información sobre el estado del volcán. A través del análisis de sus componentes y de las posibles reacciones que entre ellos pueden tener lugar podemos conocer si el sistema está o no en equilibrio y en tal caso, deducir cual es su presión y temperatura.

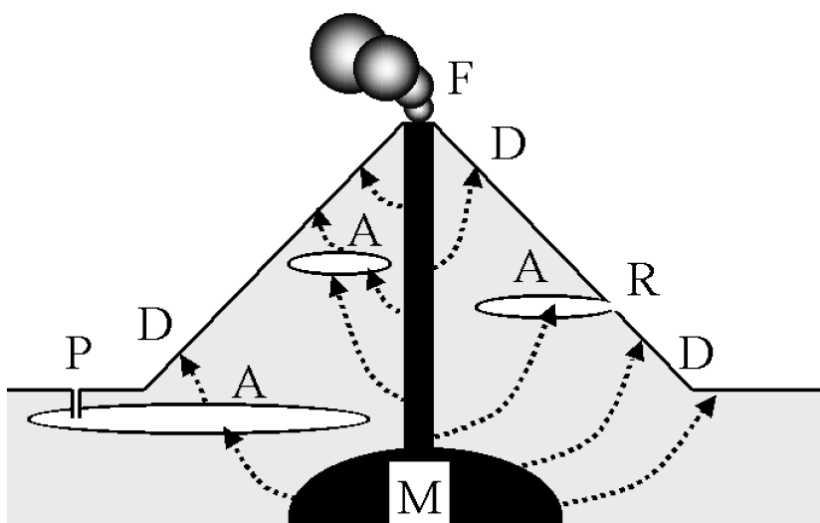


Figura 1.1. Los gases volcánicos que proceden de sistema magmático (M) llegan a la superficie a través del sistema de fracturas dando origen a las fumarolas (F). Otra parte, especialmente el  $\text{CO}_2$  se difunde a través del edificio volcánico (D). Los gases se disuelven en el agua de los acuíferos (A), apareciendo en las fuentes termales (R) o en los pozos (P)

Tradicionalmente el estudio de los gases volcánicos se ha llevado a cabo en las zonas de emisión fumaroliana próximas a los cráteres activos. Hoy en día, el descubrimiento de la emisión difusa, o sea la salida de gases a través de los flancos del volcán, permite situar los instrumentos en ambientes mucho menos agresivos y disponer de sistemas de seguimiento continuo (ver figura 1.1). El mecanismo de difusión hace posible la medida de la emisión del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y gases raros en las laderas del volcán, mientras que los gases ácidos como el  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ , en condiciones favorables pueden detectarse a distancias relativamente alejadas del cráter activo, en las zonas de mucha mayor seguridad.

La fase gaseosa de un magma está constituida por combinaciones de un limitado número de elementos: H, C, O, S, Cl, F y N, asociados con metales pesados y otros elementos. Las condiciones termodinámicas del sistema gas-líquido y gas-roca regulan las proporciones de las distintas especies. En un sistema a alta temperatura (superior a  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ) están presentes  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y otros gases. La medida de la concentración de  $\text{CO}_2$  se realiza fácilmente mediante la absorción en el infrarrojo ( $4.3\text{ }\mu\text{m}$ ).

#### **1.1.1.5 Medición de temperaturas.**

La medida de temperaturas en una zona volcánica activa puede comprender mediciones de lagos, rocas, suelo e inclusive lava. Para medir la temperatura del suelo y de la lava en forma directa se utilizan termocuplas las cuales se introducen ya sea en el suelo ó en la lava. Debido a que éstos dispositivos están diseñados para soportar altas temperaturas, no existe el peligro de daño en la puntas de prueba de este sensor.

La transmisión de calor desde el interior del volcán hasta la superficie (que es el lugar donde se encuentran los termómetros) se hace a través de las fracturas del suelo. Las medidas de temperaturas que se hacen en un volcán se reducen al control de la temperatura de las anomalías térmicas, de las rocas y de las fumarolas que son las de nuestro interés.

## **1.2 AMENAZA LATENTE EN EL VOLCÁN DE SAN SALVADOR.**

El volcán ha hecho erupción en varias ocasiones en los últimos 70,000 años desde escapes por la parte central del volcán como también desde escapes más pequeños y fisuras en sus flancos. Además, se localizan varios conos pequeños de ceniza volcánica y cráteres de explosiones en un radio de 10 kilómetros alrededor del volcán.

Las erupciones volcánicas no son los únicos eventos que ponen en riesgo a las comunidades locales. En el volcán de San Salvador existen desprendimientos de tierra históricos, de volúmenes de hasta unos cientos de miles de metros cúbicos, debido a lluvias torrenciales y temblores, algunos de los cuales se han transformado en flujos de escombros que han inundado áreas pobladas aguas abajo. Los desprendimientos de tierra destructivos debidos a lluvias o temblores así como los flujos de escombros en las cercanías del volcán de San Salvador en septiembre de 1982 y enero de 2001 demuestran que dichos movimientos masivos en El Salvador también han sido letales.

Un riesgo más amplio, pero indirecto, proveniente de los gases volcánicos emitidos por el volcán de San Salvador involucra la formación de lluvia ácida. Los compuestos de azufre son uno de los principales gases emitidos por los volcanes, por lo que una acidificación excesiva de la lluvia puede ocurrir cuando los compuestos de azufre se combinan con las gotas y el vapor de agua para formar ácido sulfúrico el cual se deposita durante las tormentas. Si dicho ácido se encuentra lo suficientemente concentrado puede dañar los cultivos, reducir la productividad de la tierra y contaminar el agua superficial. En El Salvador, la lluvia ácida resultante de la emisión de los gases volcánicos ha dañado localmente los cultivos de café, particularmente alrededor del volcán Santa Ana.

### **1.2.1 Eventos anteriores en el volcán de San Salvador.**

Ha habido tres erupciones desde el año 1500, las cuales consistieron en una serie de explosiones pequeñas de magma basáltico de baja viscosidad y el emplazamiento de flujos de lava basáltica sobre los flancos del volcán.

### **1.2.2 Actividad reciente en el volcán de San Salvador.**

La actividad volcánica más reciente en San Salvador comenzó en Junio de 1917, cuando después de un temblor emergió una oleada de vapor del cráter de El Boquerón y se abrieron fisuras, a lo largo del flanco noroeste del volcán. Después de la erupción de 1917, la actividad de las fumarolas continuó hasta finales de la década de los años 70. Aunque no ha ocurrido actividad eruptiva en el volcán de San Salvador por más de 80 años, si han ocurrido eventos letales relacionados con el volcán. En 1982 una lluvia copiosa ocasionó numerosos desprendimientos de tierra en el volcán de San Salvador, uno de estos desprendimientos se presentó en el flanco de El Picacho el cual corrió a lo largo de un canal y penetró la parte noroeste de la ciudad. El desprendimiento de tierra, que tenía un volumen

de entre 200,000 a 300,000 metros cúbicos, se transformó rápidamente en un lahar que viajó más de 4 kilómetros desde su fuente.

### **1.2.3 Actividad futura en el volcán de San Salvador.**

El volcán ha presentado erupciones violentas al menos dos veces desde el cráter central de la cumbre, una en fechas tan recientes como hace 800 años la cual podría presentarse de la misma forma en el futuro. Las erupciones explosivas son más peligrosas que aquellas que generan flujos de lava o conos de ceniza volcánica, ya que podrían afectar áreas de más de 10 kilómetros desde el volcán.

Si el magma que emerge dentro del volcán o en las cercanías de un centro monogenético interactúa con el agua subterránea o el agua superficial absorbida, esto podría producir enérgicas explosiones de vapor. Los diversos mecanismos, pueden ocurrir sobre cualquier flanco del volcán. Los principales efectos de las futuras erupciones o desprendimientos de tierra probablemente se confinarán dentro de aproximadamente 10 kilómetros alrededor de la cumbre del volcán. Sin embargo, los lahares de mayores dimensiones pueden viajar más de 10 kilómetros lejos de la cumbre, los centros monogenéticos podrían presentar erupciones con radios mayores a los 10 kilómetros y las caídas de tefra copiosas podrían desplazarse más allá de los 10 kilómetros a favor del viento. Las tefras provenientes de las erupciones probablemente caigan al este del volcán de Enero a Marzo, cubriendo potencialmente regiones amplias al este, sur y oeste en Abril y Mayo, afectando las áreas del lado oeste del volcán de Junio a Octubre y posiblemente las áreas al oeste, norte y este del volcán en Noviembre y Diciembre, esto debido a los patrones de viento en estas épocas.

### **1.2.4 Monitoreo volcánico en El Salvador.**

Actualmente la institución gubernamental dedicada a la vigilancia de fenómenos naturales y predicción de catástrofes es el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) que se encarga de la vigilancia, estudio y monitoreo de los volcanes. Este instituto se encarga de realizar diferentes estudios, preparar y publicar informes sobre varios campos de suelo, entre los cuales se encuentran estudios geofísicos, geoquímicos y el área de vulcanología que es en la que corresponde a los fenómenos de los volcanes. Además del SNET, la universidad de El Salvador ha integrado un equipo científico GIV-UES con la ayuda del Instituto Tecnológico de Energías Renovables (ITER) de España quien proporcionó soporte al inicio del proyecto y que tiene como tarea la vigilancia y monitoreo de los volcanes activos de El Salvador utilizando la Red Geoquímica Salvadoreña.



## **1.3 DESARROLLO DE LA VULCANOLOGIA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.**

### **1.3.1 Participación de la Universidad de El Salvador en la vulcanología**

La universidad de El Salvador a través de dispositivos de monitoreo volcánico, estudia la composición química de la tierra y el comportamiento de los elementos en ella, tanto en materiales sólidos como en líquidos y gaseosos. Los equipos fueron donados por el Gobierno español, y fueron construidos para recolectar muestras de las diferentes emanaciones gaseosas que fluyen del interior de los volcanes, tales como radón y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), entre otros.

El CO<sub>2</sub> es uno de los componentes mayoritarios de los gases disueltos en los magmas (lava) y su baja solubilidad hace que se escape con facilidad hacia la superficie a través de penachos volcánicos, fumarolas o en forma difusa a través de los suelos, y es que estos fluidos es importante atenderlos, sobre todo por su movilidad. Son los primeros en indicar cualquier variación térmica que se da en el interior de un volcán.

La nueva red geoquímica permite predecir las erupciones volcánicas, debido a que se hace un estudio sobre el ascenso de lava hacia la superficie, proceso que produce modificaciones térmicas y cambios de la composición química. Los primeros pasos para detectar los indicios de la actividad volcánica se obtuvieron a partir de abril de 2001, con la instalación de un equipo geoquímico en el volcán Chichontepec en San Vicente.

Actualmente se está monitoreando también los volcanes de San Salvador, San Miguel, Tecapán (Usulután), Santa Ana, Izalco (Sonsonate) y Coatepeque (Santa Ana) con estaciones multiparamétricas. El proyecto tiene un monto aproximado de \$191,500.

La red se convierte en un instrumento útil para obtener datos de las fumarolas que se encuentran alrededor del volcán, quienes llevan por difusividad los gases en su interior hasta la superficie. Las estaciones de monitoreo de gases trabajan con cantidades importantes de gases que extraen del suelo de forma difusa o dispersa y que acumulan en una cámara almacenadora. Ya leídos los datos de los volcanes en las puntos de interés, son transmitidos por una radio que envía los datos hasta una base receptora ubicada en alguna ciudad o población cercana.

El lugar donde se reciben los datos tiene nombre de: “estación base”. Su función consiste en interpretar los datos de manera digital. Mostrando en manera gráfica la interpretación de los datos en una computadora.

### **1.3.2 Resultados del trabajo realizado por el GIV-UES**

Hasta la fecha la Red Geoquímica Salvadoreña ha proporcionado datos de un gran interés científico. Aun cuando la finalidad de las estaciones geoquímicas instaladas en El Salvador es la vigilancia de los sistemas volcánicos de Santa Ana, San Salvador, San Vicente y San

Miguel, éstas estaciones pueden ser útiles para la detección de señales precursoras de terremotos que ocurran en las cercanías de estos volcanes. El equipo científico del GIV – UES con ayuda del ITER, a través de la estación geoquímica instalada en el volcán de San Vicente, fue capaz de detectar una señal geoquímica precursora del terremoto de magnitud 5.1 en la escala Richter ocurrido el pasado 8 de mayo de 2001 en las cercanías de la ciudad de San Vicente, núcleo urbano fuertemente afectado por el terremoto de magnitud 6.1 el 13 de febrero de 2001.

Estos resultados han sido aceptados para su publicación en la prestigiosa revista científica "Earth and Planetary Science Letters".

Otro de los resultados de interés obtenido por la Red Geoquímica Salvadoreña es haber detectado con diez días de antelación una señal geoquímica precursora de una pequeña crisis volcánica ocurrida en el volcán San Miguel el 16 de enero de 2002.

Una misión alemana preparó un mapa geológico en donde se muestra que los volcanes de San Salvador son atravesados por fallas. Estas son el camino por donde puede el magma, que es roca fundida, salir a la superficie, transformarse en lava y formar la erupción.

## **CAPITULO II**

### **TEORIA DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO DE LA ESTACIÓN MULTIPARAMÉTRICA**

#### **INTRODUCCION**

En el presente capítulo se da a conocer el diseño de un sistema de monitoreo vulcanológico, proyecto que es implementado, junto al Grupo de Investigaciones de la UES (GIV-UES), en el Volcán de San Salvador. Este sistema está conformado por diversos sensores los cuales nos permiten medir los parámetros físicos vulcanológicos de mayor importancia y a través de los dispositivos adecuados, estos datos son enviados a una estación remota la cual está situada en las instalaciones de la Universidad de El Salvador.

La transmisión de datos se realiza vía WI-FI y dicha actividad está programada a través de un microcontrolador para ser realizada cada cierto periodo según lo solicite la estación base (se ha establecido que el período sea cada hora). En la estación base, se coloca una computadora personal en donde se pueden observar y analizar los datos medidos por los sensores en la estación multiparamétrica a través de un instrumento virtual desarrollado bajo el programa LabView, programa diseñado especialmente para aplicaciones de instrumentación electrónica.

Actualmente, el GIV-UES posee un sistema de monitoreo vulcanológico en cuatro de los cinco volcanes de nuestro país. Al igual que el sistema diseñado, éstos constan de diferentes sensores los cuales capturan los parámetros físicos y los envían hacia un punto remoto en donde esta información es descargada cada cierto tiempo (por lo general, cada semana) para su respectivo análisis.

Debido a las actividades sísmicas sufridas en los últimos años en nuestro país, se ha establecido en base a criterio del GIV-UES, que este nuevo sistema de monitoreo sea colocado en el volcán de San Salvador para llevar un mejor control sobre dicho Volcán.

## **2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad, debido a los diferentes fenómenos vulcanológicos y sísmicos que se han generado en nuestro país en los últimos 5 años, el Grupo de Investigaciones vulcanológicas lleva un control continuo sobre los cambios físicos que se dan en los cuatro volcanes más importantes de El Salvador.

Para realizar dicho control, las personas del GIV-UES han colocado en cada uno de estos puntos, un sistema electrónico de muestreo el cual censa algunos parámetros físicos tales como; temperatura del aire y suelo, humedad relativa del aire y suelo, Sulfuro de Hidrogeno, CO<sub>2</sub>, etc. y los envía a través de transmisión UHF. Estos datos son recibidos en algún punto remoto cercano al volcán para ser guardados en una base de datos y semanalmente ser descargados ya sea trasladándose hasta el punto remoto o vía Internet.

Este sistema de control normalmente no lleva un control diario sobre los cambios en el entorno físico del volcán, ya que en algunos casos el punto remoto hacia donde se envían los datos no corresponde al lugar en donde se encuentra el personal del GIV-UES, como es el caso del Volcán de San Salvador, en el cual los datos son enviados a La Geo en Santa Tecla. Para este caso en especial, se debe llevar un control más preciso y continuo ya que según los expertos en el tema, este volcán por el momento, es el más propenso a hacer erupción. Por eso es recomendable y necesario un segundo sistema de monitoreo en donde se pueda controlar a diario su actividad.

## 2.2 JUSTIFICACION

Actualmente según los vulcanólogos, el volcán más propenso a presentar algún cambio considerable en su entorno físico que podría indicar una futura erupción es el de San Salvador, el cual hizo su última erupción en el año 1917.

Considerando que el tiempo promedio entre dos erupciones de un mismo volcán oscila entre los 80 a 100 años, se necesita de una segunda estación de monitoreo que cense continuamente los parámetros físicos vulcanológicos más importantes y los envíe cada cierto periodo de tiempo directamente hacia el GIV-UES. Además, éste debe poseer en su punto de recepción, una computadora personal que permita visualizar directamente los datos y facilitar su respectivo análisis.

Otro factor determinante en la implementación de éste sistema es el hecho que El Salvador como país vulnerable a éste tipo de catástrofes naturales (erupciones volcánicas) no debe depender en un cien por ciento de otros países para predecir éstos fenómenos y esperar hasta entonces para actuar y tomar las medidas adecuadas, sino que debe producir su propia tecnología capaz de funcionar de la misma forma que otros equipos con tecnologías extranjeras y con igual confiabilidad. De esta manera, el GIV-UES pretende que estos equipos funcionen paralelamente ó independientemente de los que ya están en operación, con la finalidad de ser cada vez más autónomos en los campos de investigación y predicción de desastres naturales.

## **2.3 TEORIA SOBRE EQUIPOS DE MEDICIÓN VULCANOLÓGICA**

### **2.3.1 Medida de gases volcánicos.**

El análisis de los gases volcánicos es una de las técnicas más utilizadas para el monitoreo de la actividad volcánica. Los gases, por su extraordinaria difusividad, llevan hasta la superficie información sobre el estado del volcán. A través del análisis de sus componentes y de las posibles reacciones que entre ellos pueden tener lugar podemos conocer si el sistema está o no en equilibrio y en tal caso, inferir cual es su presión y temperatura. Sin embargo, la vigilancia geoquímica de la actividad volcánica es una técnica relativamente joven, mientras que los métodos geofísicos, especialmente la sismología, hace tiempo que están universalmente aceptados. Muchos factores han intervenido para que los métodos geoquímicos hayan experimentado un desarrollo más lento. En primer lugar está la dificultad de obtener muestras significativas de los gases volcánicos, pues durante muchos años solo se disponía de datos de unos pocos volcanes.

La medición de la composición química de los gases de forma continua es de gran importancia ya que nos facilita un gran número de datos, lo que revierte en un mejor conocimiento del sistema en estudio, así como la posibilidad de identificar las variaciones de corto período.

Tradicionalmente el estudio de los gases volcánicos se ha llevado a cabo en las zonas de emisión fumaroliana próximas a los cráteres activos. Hoy en día el descubrimiento de la emisión difusa, es decir la salida de gases a través de los flancos del volcán, ha permitido situar los instrumentos en ambientes mucho menos agresivos y disponer de sistemas de seguimiento continuo.

El mecanismo de difusión hace posible la medida de la emisión del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y gases raros en las laderas del volcán, mientras que los gases ácidos como el  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ , en condiciones favorables pueden detectarse a distancias relativamente alejadas del cráter activo, en zonas de mucha mayor seguridad. Este tipo de emanaciones posibilitan el desarrollo de sistemas para el seguimiento continuo de la emisión gaseosa en volcanes activos.

### **2.3.2 Análisis de gases.**

El muestreo de gases es una de las técnicas de monitoreo que permite a los investigadores poder hacer una predicción bastante buena del comportamiento a futuro de un volcán activo dependiendo de los cambios en las concentraciones de gases. Para realizar el análisis de gases se ha desarrollado varios métodos de muestreo como; toma de muestras, cromatografía, espectrógrafo de masas y los métodos espectrométricos siendo el último el de nuestro interés.

### 2.3.2.1 Toma de muestras

El método más sencillo para el análisis de gases volcánicos consiste en muestrear directamente las emanaciones, utilizando una botella donde se ha hecho el vacío o se ha llenado parcialmente de un reactivo para capturar determinadas especies y evitar la posterior reacción entre ellas. Luego, la muestra se analiza utilizando los procedimientos clásicos de la química analítica. Durante mucho tiempo éste ha sido el único sistema para conocer la composición de los gases volcánicos.

### 2.3.2.2 Cromatografía

El instrumento más extendido para análisis de gases es el cromatógrafo, cuyo fundamento es el tiempo que tardan los distintos gases en recorrer una columna rellena de un material poroso, impulsado por un gas de referencia. A la salida de la columna se dispone un detector sensible a los distintos gases. Hay muchos tipos de detectores, siendo el de conductividad térmica el de uso más común, en combinación con una columna molecular de 5 Å y Ar u O<sub>2</sub> como gases impulsores.

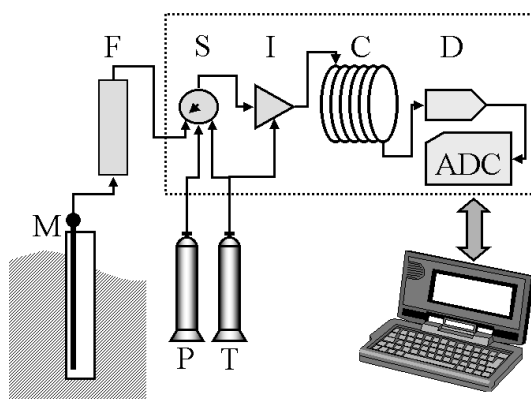


Figura 2.1 *Aplicación del cromatógrafo.*

La figura 2.1 muestra la aplicación de un cromatógrafo para analizar de forma continua las emanaciones gaseosas de un manantial M. Se utiliza un separador F para evitar que el vapor de agua penetre en exceso dentro del sistema de análisis. El cromatógrafo está dotado de un sistema de llaves electromagnéticas que permiten alternar la entrada del gas a medir y un gas patrón P que se utiliza para calibrar el sistema. Un computador controla todo el sistema, almacena los datos y los transmite periódicamente al observatorio.

### 2.3.2.3 Espectrógrafo de masas

El espectrógrafo de masas es otro equipo que también se está utilizando para conocer las variaciones en la composición de los gases volcánicos, siendo capaces de detectar niveles bajos en la concentración del gas. El principio de operación consiste en ionizar el gas,

acelerarlo y luego hacerlo pasar entre las piezas polares de un imán, antes de llegar al detector. La desviación es función de la masa del ión y de esta forma se conoce la especie y la concentración.

#### **2.3.2.4 Métodos espectrométricos**

Los métodos espectrométricos consisten en analizar el espectro de emisión (o absorción) del gas e identificar así las distintas especies. Por ejemplo, la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> se realiza fácilmente mediante la absorción en el infrarrojo (4.3 μm). Otras técnicas espectrométricas consisten en medir el desplazamiento de determinadas líneas de emisión de un elemento en presencia de otro gas. Un ejemplo es la medida de niveles muy bajos de SO<sub>2</sub> utilizando el desplazamiento de la emisión del mercurio.

El análisis de CO<sub>2</sub> es el que nos interesa realizar, para ello se hace uso de éste método con la ayuda de un sensor que se encarga de tomar la muestra del gas y convertirla en una señal eléctrica que representa dicha lectura.

La determinación del CO<sub>2</sub> mediante detectores de infrarrojo es uno de los métodos espectrométricos de análisis de gases. Se ha observado que a distancias moderadas del volcán existe una emisión difusa de CO<sub>2</sub> que destaca sobre el fondo de origen orgánico. A estas distancias, las componentes más agresivas del gas volcánico son suficientemente pequeñas para no presentar problemas graves de corrosión en los instrumentos. Además, el CO<sub>2</sub> es posible determinarlo por absorción infrarroja mediante instrumentos sencillos y de bajo costo.

##### **2.3.2.4.1 El sensor de CO<sub>2</sub>.**

El CO<sub>2</sub> presenta una banda de absorción a 4.3 μm suficientemente alejada de las bandas de absorción de otras posibles componentes gaseosas del gas. Para estas longitudes de onda es posible utilizar un sensor piroeléctrico de estado sólido dotado de un filtro selectivo que se encuentra fácilmente en el mercado (Figura 2.2). El efecto piroeléctrico consiste en el desplazamiento de cargas en el seno de un semiconductor cuando éste recibe radiación infrarroja. Sin embargo, cuando aumenta su temperatura vuelve al estado original. Por este motivo es necesario interrumpir periódicamente el haz infrarrojo que ilumina al sensor. De este modo, a la salida obtendremos una señal periódica correspondiente al movimiento periódico de las cargas. Para facilitar su manejo, los fabricantes de sensores piroeléctricos dotan a éstos sensores de un amplificador integrado para la adaptación de impedancias. Las primeras realizaciones exigían una fuente intensa de infrarrojos a 4.3 μm y un dispositivo mecánico para interrumpir el haz. El aumento de la sensibilidad y estabilidad de los sensores piroeléctricos hace que hoy sea posible utilizar una pequeña lámpara incandescente que se ilumina periódicamente durante unos pocos segundos.





Figura 2.2 Fundamento de un sensor de CO<sub>2</sub>: 1. tubo de medida por el que se hace circular el gas, 2. lámpara emisora de infrarrojos, 3. sensor piroeléctrico.

### 2.3.2.4.2 Funcionamiento del sensor.

Los sensores piroeléctricos se construyen con un elemento semiconductor, en el cual se produce un desplazamiento de cargas cuando sobre él incide radiación infrarroja. Sin embargo en poco tiempo el sensor vuelve a su condición de equilibrio. Por éste motivo es sólo sensible a cambios en la intensidad de la radiación infrarroja. La utilización práctica se hace interrumpiendo el haz infrarrojo mediante un dispositivo mecánico o bien usando una fuente intermitente. En este caso se utiliza una lámpara de incandescencia que se ilumina durante dos segundos cada dos segundos. El periodo de encendido y apagado de la lámpara depende de las características del sensor y lámpara utilizados.

El mejor rendimiento se consigue ajustando el período hasta lograr la máxima diferencia entre el máximo y el mínimo. Esta diferencia es proporcional a la intensidad de la radiación recibida. Para la medida del CO<sub>2</sub> debe se usa un sensor piroeléctrico que posea un filtro pasa banda, centrado en la longitud de onda de absorción de 4,3 μm. En este caso, cuando no hay CO<sub>2</sub> en el sistema se obtiene el máximo voltaje (V<sub>0</sub>) a la salida. La presencia de CO<sub>2</sub> absorbe parte de radiación infrarroja y la señal es un valor menor V. Con un haz lineal que atraviesa una longitud x, la intensidad I recibida responde a la ley de atenuación de Beer-Lambert.

$$I = I_0 e^{-Ix}$$

Siendo  $I_0$  la intensidad recibida sin absorción (en el vacío). En la práctica el comportamiento del sensor difiere de este modelo debido a que el haz infrarrojo utilizado no se puede considerar lineal, sino que es la superposición de muchos caminos con múltiples reflexiones en las paredes de la cámara. La relación entre el contenido en CO<sub>2</sub> dado como presión parcial y la señal proporcionada por el sensor se obtiene mediante una calibración, respondiendo a una función del tipo:

$$pCO_2 = ae^{b(I_0-I)}$$

Donde  $a$  y  $b$  son dos constantes determinadas experimentalmente.  $I_0$  es la intensidad sin gas (se puede obtener haciendo el vacío en la cámara) e  $I$  la intensidad obtenida en la medida del gas. El problema se concentra en que la determinación de  $I$  se realiza a partir de un voltaje proporcionado por el sensor en la forma:

$$I = KV$$

$K$  varía fuertemente con la temperatura ( $.2\%/^{\circ}\text{C}$ ). Por este motivo hay que disponer un termómetro muy próximo al sensor piroeléctrico y poder corregir por temperatura.

#### 2.3.2.4.3 Método de la cámara de acumulación.

Esta técnica permite medir el flujo de  $\text{CO}_2$  emitido por el suelo a la atmósfera. Aunque este flujo es relativamente elevado, incluso en áreas no activas, a nivel del suelo encontramos valores que poco difieren del contenido medio en  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. El método consiste en evitar que el  $\text{CO}_2$  emitido por el suelo se difunda en la atmósfera, para ello se coloca una cámara cerrada que lo impide tal como se puede apreciar en la figura 2.3. Esta cámara de acumulación se sitúa directamente sobre el suelo, pero más específicamente sobre una fuente de  $\text{CO}_2$  que puede ser una fumarola. La cámara queda sellada de tal forma que impida las fugas del gas mientras se está tomando las muestras. La forma en que opera el sistema es llevando hacia el sensor por medio de una bomba de succión el gas, luego el sensor se encarga de hacer la lectura para que sea interpretada por los vulcanólogos y finalmente el gas se regresa hacia la cámara para que incremente su concentración. El medidor de  $\text{CO}_2$  toma medidas periódicamente, por ejemplo cada 10 segundos. Antes de colocar la cámara, el nivel de  $\text{CO}_2$  es el atmosférico, una vez cerrada la cámara, la concentración de  $\text{CO}_2$  va aumentando con el tiempo, la pendiente de la concentración con el tiempo nos da el flujo de  $\text{CO}_2$ .

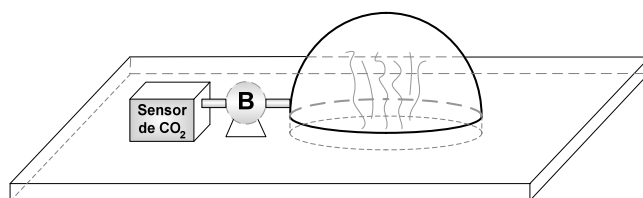


Figura 2.3. Cámara de acumulación utilizada para leer la concentración de  $\text{CO}_2$ .

#### 2.3.2.4.4 Cálculo de la concentración de $\text{CO}_2$

La muestra tomada por el sensor es un valor instantáneo, sin embargo lo que realmente se desea saber es el cambio de la concentración de  $\text{CO}_2$  en el ambiente, por tanto se hace uso de un método gráfico para obtener ésta concentración (que es igual a la pendiente de la curva) basándose en el gráfico de los resultados instantáneos que brinda el sensor que de forma gráfica pueden verse como la curva en la figura 2.4 que muestra los ppm de  $\text{CO}_2$  en un tiempo determinado.

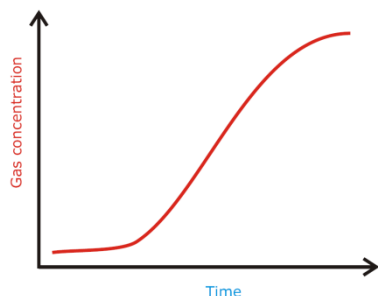


Figura 2.4. Curva de concentración de  $CO_2$ .

En primer lugar se necesita convertir la señal de salida del sensor de  $CO_2$  a su equivalente en ppm para poder construir el gráfico del que se obtiene la concentración de  $CO_2$ . Para hacerlo solo se necesita los valores máximos de ppm que brinda el sensor y el de voltaje de salida de éste. Este cálculo sencillo se hace con la siguiente fórmula:

$$CO_2 = V \left( \frac{C_{range}}{V_{range}} \right)$$

Donde  $V$  representa el valor de la señal de salida,  $C_{range}$  es el valor máximo de ppm que cuantifica el sensor y  $V_{range}$  es el máximo valor de salida de la señal del sensor.

En la figura 2.5 se observa dos concentraciones de  $CO_2$  que se derivan de la misma curva;  $C_{soil}$  representa la concentración de  $CO_2$  en el suelo y  $C_{air}$  la concentración de  $CO_2$  en el aire (el valor común es 350 ppm). Se necesita un tiempo considerable para que el valor de la concentración de  $CO_2$  alcance su valor máximo.

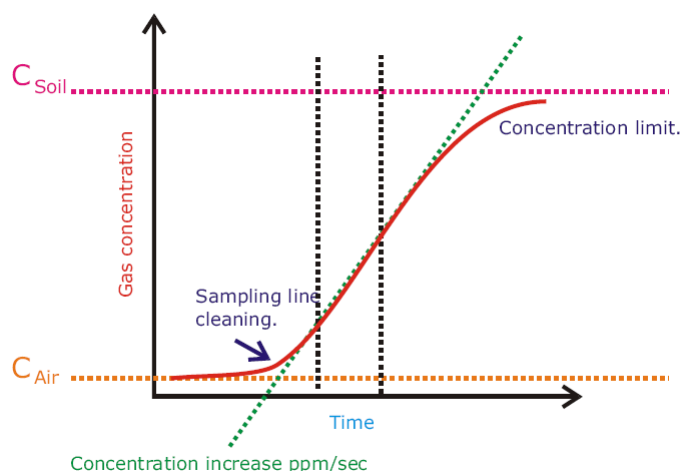


Figura 2.5. Curva de concentración de  $CO_2$  en el aire y  $CO_2$  en el suelo.

La parte inicial de la curva “Sampling line cleaning” es la que se obtiene cuando el gas está siendo bombeado desde la cámara de acumulación a través de los tubos hacia el sensor de CO<sub>2</sub> pasando por la bomba. Cuando el tiempo va transcurriendo, la concentración del CO<sub>2</sub> va incrementando su valor y describe una pendiente positiva casi constante. Transcurrido el suficiente tiempo necesario, la concentración se acerca cada vez más a su valor máximo y llega al límite de concentración. Las líneas perpendiculares marcan claramente el área en donde se hace el cálculo de la pendiente que representa el flujo.

Para tomar el mejor intervalo donde se va a hacer el cálculo de la pendiente, se toma como un buen punto de partida el valor de las ppm cuando ha transcurrido un minuto de tiempo y como punto final el valor final de la curva de flujo. Sin embargo la pendiente no es del todo lineal, se hace una aproximación utilizando un coeficiente angular **a**, que representa una línea recta con pendiente similar a la pendiente de la curva de flujo en el intervalo seleccionado como se observa en la figura 2.6. Este coeficiente se calcula con la fórmula siguiente:

$$a = \frac{\sum x \cdot y - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

En esta fórmula **X** representa el tiempo en segundos, **Y** representa la concentración expresada en ppm y **n** el número de puntos que se encuentran dentro del intervalo seleccionado. Las unidades de **a** son ppm/seg y representa la pendiente de la curva del flujo dentro del intervalo que se seleccionó.

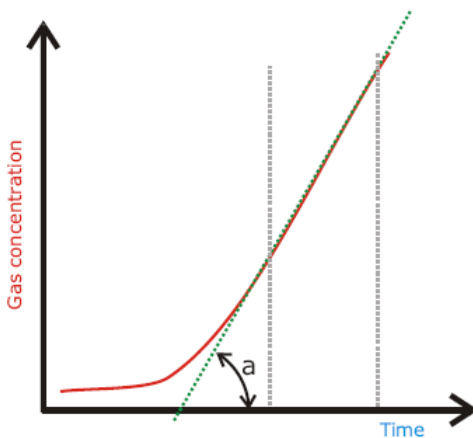


Figura 2.6. Regresión lineal del segmento de la curva de flujo, delimitado por las líneas verticales.

El factor de calidad de la regresión lineal se calcula con los mismos valores de los puntos que se usan para el cálculo de **a**, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{ErrQ} = \frac{\left(\sum x \cdot y - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}\right)^2}{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right] \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right]}$$

El factor de calidad varía en un rango de 0 a 1. Los valores entre 0 y 0.5 indican que la regresión no es buena y que no se aproxima al valor real de la pendiente. Los valores entre 0.9 y 1 indican que la regresión ha sido bastante buena y que el valor de **a** calculado realmente representa una buena aproximación de la pendiente de la curva del flujo.

#### **2.3.2.4.5 Consideraciones sobre la medida del CO<sub>2</sub>.**

Los suelos emiten flujos considerables de CO<sub>2</sub> de origen orgánico. Las variaciones de presión y las precipitaciones provocan importantes variaciones en los flujos emitidos. Es importante realizar un concienzudo análisis estadístico de los datos antes de establecer cualquier hipótesis. El CO<sub>2</sub> que llega al sensor lo hace mediante un mecanismo de difusión y como tal difusión es un fenómeno lento. Por ello los instrumentos para la medida continua, toman muestras a velocidades muy lentas, por ejemplo un dato a la hora.

El instrumento puede estar en modo bajo consumo (espera), arrancar, realizar una serie de medidas hasta alcanzar la estabilidad (este tiempo depende de cada instrumento), tomar los datos y volver a la situación de espera.

### 2.3.3 Medida de temperaturas.

La medida de temperaturas es una de las técnicas más antiguas en el estudio de la actividad volcánica. Sin embargo no es sencilla, ya que frecuentemente se encuentran temperaturas muy altas, en ambientes muy agresivos y que no resultan fáciles de medir con los métodos tradicionales. Un aspecto importante, que no debe olvidarse cuando se está trabajando en el estudio de las anomalías térmicas en un área volcánica activa, es que la temperatura que se mide es la manifestación de un complejo mecanismo de transmisión de calor. Este proceso de transmisión de calor es siempre complejo y no tiene porque haber alcanzado el equilibrio. En él convergen fenómenos de conducción en tres dimensiones, junto con procesos convectivos y ablativos, que en muchos casos llevan asociados cambios de fase y todo ello en un sistema del que se desconoce su estructura.

La transmisión de calor del foco a la superficie, donde se encuentran los termómetros, se realiza mediante un mecanismo de transporte por fluidos a través del sistema de fracturas (convección-ablación) y también por conducción como en la figura 2.7.

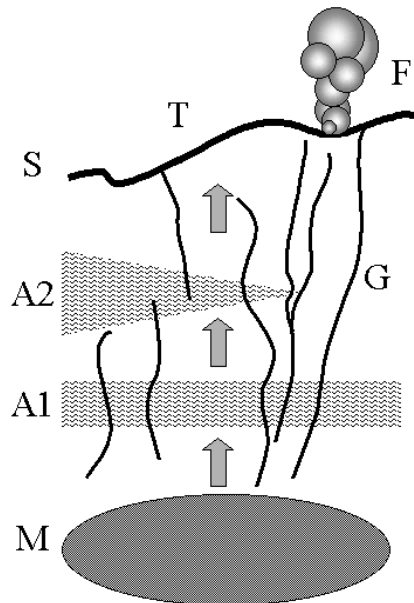


Figura 2.7 (Convección ablación). Un aparato volcánico debemos considerarlo desde el punto de vista de la termometría formado por un foco térmico M que puede ser una cámara magmática somera, un conducto magmático o restos de las últimas erupciones y que todavía permanecen calientes. Un sistema de fracturas G que de forma más o menos directa nos conecta el foco térmico con el exterior o con niveles superiores. Además existen acuíferos que tanto pueden abarcar toda la zona A1 o estar limitados A2. Estos acuíferos pueden estar confinados y sellados con fluidos a alta presión. En superficie aparecerán fumarolas F cuando el flujo de gases es elevado y sólo suelos calientes cuando estos se diluyen con el aire T.

Las medidas de temperatura que pueden hacerse en un volcán se reducen al control de la temperatura de las fumarolas, de las anomalías térmicas, ya sean fuentes termales o suelos calientes, lagos cratéricos y temperatura de roca.

### 2.3.3.1 Sensores de temperatura.

Actualmente es posible disponer de múltiples sensores de temperatura, los más utilizados y conocidos son los termómetros, sin embargo para tomar medidas de temperaturas en diferentes puntos de un volcán no podemos usar los termómetros tradicionales por diferentes razones. Existe otra variedad de sensores de temperatura que se usan en ambientes hostiles y que son apropiados para condiciones ambientales extremas. Los sensores son clasificados según sus características y su principio de funcionamiento. De forma general son separados como se muestra en la tabla 2.1.

Fundamento		Características	
Dilatación	Gas	altas temperaturas	
	Líquido	clásico termómetro de mercurio	
	Metal	alta temperatura	
	Bimetal	industrial, alta y baja temperatura	
Resistencia	Metal	resistencia de platino, muy alta precisión	
	Semiconductor	Pasivo	baja linealidad, histéresis
		Activo	alta precisión, margen limitado
Termopar		altas temperaturas, necesita referencia	
Radiación	Infrarrojo	sin contacto, altas temperaturas	
	Visible	sin contacto, muy altas temperaturas	
Elasticidad		oscilador de cuarzo, muy alta precisión	
Acústico		sin contacto, temperatura de fluidos	

Tabla 2.1 *Familias de Termómetros.*

En el cuadro destacan varios aspectos: hay una serie de termómetros que no requieren contacto físico, estos pueden utilizarse para medir temperaturas a distancia, como es el caso de una colada de lava o la actividad stromboliana. Otros, por el contrario, requieren contacto térmico con el medio a medir. Este contacto siempre presenta una resistencia térmica, la cual falsea la medida, y lo que es más grave, puede variar con el tiempo. Todos los termómetros que se basan en la dependencia térmica de las propiedades eléctricas, usan una electrónica asociada, la cual puede plantear serios problemas a temperaturas extremas. Algunos sensores precisan de una calibración continua, como es el caso del infrarrojo, otros, de una referencia como los termopares, y en general, todos ellos requieren un adecuado estudio para pasar de la indicación que nos da el termómetro a la temperatura del medio que queremos medir. Este punto es especialmente importante en volcanología, donde las temperaturas se miden en los lugares que se puede y no donde se quisiera.

### 2.3.3.2 Termómetros de termopar.

Para altas temperaturas prácticamente se usan solo termopares. Estos dispositivos son habituales en la industria, por lo que se adquieren sin dificultad y a bajo precio. Es fácil encontrar termopares ya encapsulados que pueden operar satisfactoriamente a 1100°C en ambientes agresivos, más que suficiente para todas las aplicaciones prácticas que se implementan en un volcán. Los termopares que se usan tienen encapsulados resistentes a los gases presentes en las fumarolas. La longitud del termopar es suficiente para colocar la electrónica de medida en una zona de baja temperatura.

Los termopares están contruidos con dos conductores distintos unidos en un extremo con un punto fino de soldadura. En el otro extremo se obtiene una diferencia de potencial que depende de la diferencia de temperaturas entre la soldadura y el extremo libre. Por esta razón para obtener la temperatura correspondiente al punto que se desea medir, hay que tener en cuenta el sumar a la lectura del termopar la temperatura del extremo libre.

Para conseguir que las uniones del termopar y el circuito de compensación estén a la misma temperatura se colocan ambos sobre una masa térmica que simplemente es una zona amplia de cobre sobre el mismo circuito impreso. La suma de ambas señales se hace directamente atenuando la señal del sistema de referencia para que tenga la misma sensibilidad del termopar y luego conectamos ambos dispositivos en serie a un amplificador para medir la temperatura directamente en voltios.

Este tipo de termómetros junto al termómetro de semiconductor son los que por sus características se usan en la medición de temperaturas del suelo y ambiente como sensores para detectar cambios significativos en el volcán. Las características más destacadas de los termopares estándar utilizados actualmente se presentan en la tabla 2.2:

Tipo	Metales	Sensibilidad $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (a 0°C)	Rango $^\circ\text{C}$
J	Hierro / Níquel Cobre	52.3	-200 a 850
T	Níquel Cromo / Níquel Aluminio	42.8	-50 a 200
K	Níquel Cromo / Níquel Aluminio	40.8	-200 a 1100
N	Níquel Cromo Sílice / Níquel Sílice	40.8	-230 a 1230
R	Platino / Platino Rodio	6.4	-200° a 1350°

Tabla 2.2 *Características de los termopares.*

### 2.3.3.3 Termómetro de semiconductor.

Actualmente hay una gran variedad de sensores de temperatura basados en el empleo de semiconductores. Desde los simples elementos de tipo resistivo, conocidos como termistores que poseen grandes coeficientes de temperatura positiva (PTC) negativa (NTC)



y que son los más utilizados, hasta sofisticados circuitos integrados que ofrecen unas excelentes características y que también incluyen circuitería necesaria para la transmisión a distancia de la información.

Hoy en día los sensores más utilizados son aquellos que incorporan en su interior la propia electrónica capaz de excitar directamente un equipo de medida o de acoplarse al sistema de adquisición de datos o de telemetría. Los elementos más utilizados son del tipo fuente de corriente AD590 o fuente de tensión como el LM35, LM34, LM135, ambos estándar industrial y por ello de bajo costo. El AD590 funciona como fuente de corriente y para su operación precisa solamente de una fuente de alimentación y una resistencia (generalmente de  $1\text{K}\Omega$ ). En los extremos de la resistencia obtenemos una diferencia de potencial proporcional a la temperatura absoluta en grados kelvin (K). Por el contrario, el LM35 nos da directamente la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ , el LM34 en  $^{\circ}\text{F}$  y el LM135 en K. El AD590 puede operar satisfactoriamente en un rango de  $-55$  y  $+150^{\circ}\text{C}$ , con una sensibilidad de  $1\mu\text{A/K}$ .

El bajo costo y la facilidad de disposición hacen que este sea uno de los sensores más utilizados para la medida de temperatura, aunque ahora está siendo reemplazado por el LM35 (Figura 2.8) que permite obtener directamente la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ . Este tipo de termómetro junto al termopar son los que ofrecen las mejores ventajas y facilidades para el muestreo de temperaturas en el sistema.

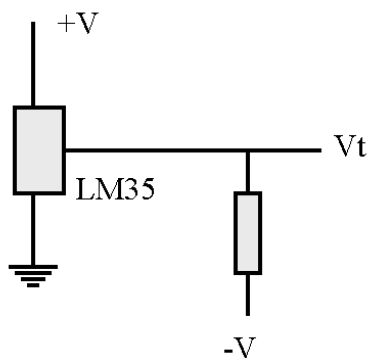


Figura 2.8 *El LM35 se comporta como un generador de tensión, proporcionando directamente un voltaje de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ .*

Este sensor es capaz de operar a temperaturas por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ , sin embargo hay que polarizarlo usando una fuente negativa y una resistencia de forma que la corriente sea del orden de  $50\mu\text{A}$ . El circuito de aplicación es muy simple y al funcionar como fuente de corriente tolera bien las grandes longitudes de cable sin problemas de oscilaciones o aumento considerable de ruido.

El LM35 es un pequeño circuito integrado que proporciona a su salida una tensión proporcional ( $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ ) a la temperatura centígrada de su encapsulado. Este dispositivo no necesita calibración, por lo que en la mayoría de aplicaciones, se usa directamente sin

necesidad de incluir elementos de ajuste. Cuando usamos cables largos también se utiliza una red RC para estabilizar el circuito y evitar oscilaciones.

### 2.3.4 Medida de potencial espontáneo.

El estudio del potencial espontáneo en volcanes activos presenta dos vertientes, por una parte la realización de mapas de anomalías de potencial, que reflejan mayoritariamente el sistema de fracturas por donde circulan fluidos. Por otra, el estudio de las fluctuaciones de potencial relacionadas con cambios en el sistema volcánico.

#### 2.3.4.1 Variaciones de potencial.

Las variaciones en el potencial del suelo se dan por factores como; la composición química del suelo, la humedad, fracturas en éste y otras. El potencial espontaneo lo medimos utilizando como referencia una barra de cobre enterrada en un punto fijo y utilizando dos barras más como electrodos. Un electrodo que se comporta razonablemente bien, especialmente en áreas volcánicas activas donde las anomalías de potencial son grandes, es una simple placa de plomo como se muestra en la figura 2.9.

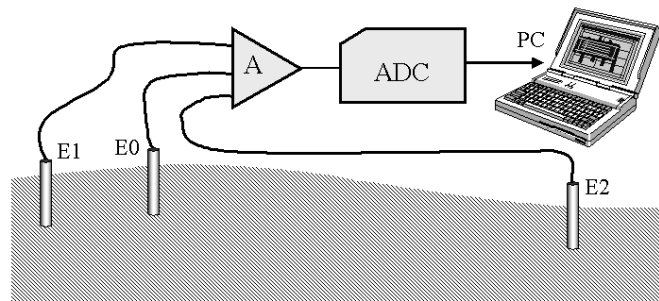


Figura 2.9 El estudio de las variaciones de potencial requiere un par de electrodos fijos (E1 y E2), conectados a un amplificador diferencial (A), un convertidor analógico digital (ADC) y un sistema de adquisición de datos (PC). Se suele incluir un electrodo de referencia (E0) para evitar diferencias de potencial entre la masa del sistema de adquisición de datos y tierra.

#### 2.3.4.2 Sistema electrónico.

La medida de potencial espontaneo se realiza utilizando un mili voltímetro de alta impedancia de entrada, con un filtro de radiofrecuencia (una simple autoinducción y dos condensadores como lo muestra la figura 2.10) a la entrada para evitar posibles interferencias por las emisoras de radio o las líneas de distribución de energía eléctrica. Una sensibilidad de 0.1 mili voltios es suficiente para detectar variaciones considerables.

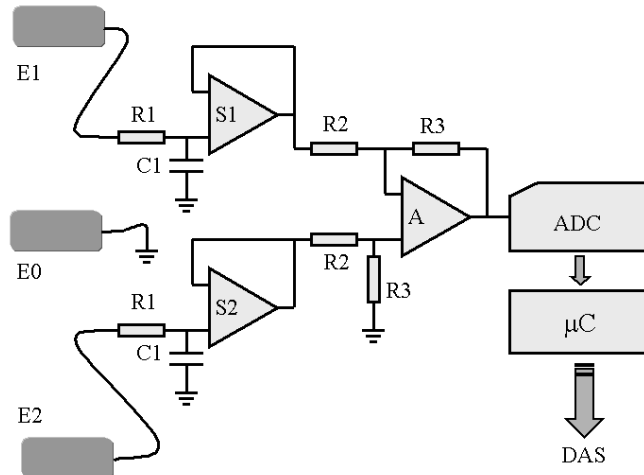


Figura 2.10 Amplificador diferencial para el estudio de variaciones de potencial espontáneo. Se utiliza un montaje convencional, los electrodos de medida (E1 y E2) se conectan a través de dos filtros RC pasa bajos (R1C1) a dos amplificadores montados como seguidor (S1 y S2). La salida de éstos va a un amplificador diferencial (A). Los pares de resistencias R2 y R3 permiten variar la ganancia del circuito ( $R3/R2$ ). A la salida se dispone el convertidor analógico digital ADC. Un microcontrolador ( $\mu C$ ) prepara la secuencia de datos en el formato requerido por el sistema de adquisición (DAS). El electrodo de referencia (E0) se conecta a la tierra del circuito.

Para el registro de las variaciones del potencial espontáneo se requiere un amplificador diferencial de alta impedancia de entrada. En principio, no plantea ninguna dificultad el diseño de este amplificador, sin embargo hay que cuidar algunos detalles. El amplificador está precedido por un filtro de radiofrecuencia que evita que las líneas para la medida del potencial actúen como antenas para las emisoras de radiodifusión. También está protegido contra los transitorios de alta tensión, pues las líneas captan las inducciones provocadas por las caídas de rayos, provocando la destrucción del amplificador.

### 2.3.5 Medición de la sismicidad

El seguimiento de la actividad sísmica es la forma más antigua de vigilancia volcánica. Ya en el siglo XIX aparecieron los primeros sistemas que se consideraron como sismógrafos. Estos sistemas registraban sobre una banda de papel ahumado el movimiento del suelo amplificado mediante un sistema de palancas, el movimiento relativo de una pesada masa inercial. Posteriormente en el siglo XX aparecieron sistemas con registro electromagnético y luego los sistemas electrónicos. Hoy en día la instrumentación de monitoreo de cualquier volcán tiene como punto de partida la instalación de un sismómetro seguido de más instrumentos de monitoreo.

La medida de la sismicidad tiene considerables ventajas en comparación con otro tipo de análisis, entre ellas están el desarrollo en ésta rama por parte de las universidades y centros

ó grupos de investigación, el costo menor comparado con otros instrumentos y sobre todo la facilidad de realizar un análisis elemental de los datos obtenidos.

En general, la actividad sísmica en un volcán activo, incluso en períodos de reposo, es muy intensa, con una gran cantidad de eventos de poca magnitud y que suelen presentarse como enjambres. El aumento de la actividad del volcán lleva asociado un incremento de la actividad sísmica, además de la ocurrencia simultánea de otros eventos. Incluso durante las fases más activas, los eventos son por lo general de moderada magnitud, aunque en la zona se dan eventos de magnitud considerable asociados a otros procesos geodinámicos.

La vigilancia sísmica de los volcanes tiene como punto de partida identificar claramente las pautas de la actividad sísmica durante la fase de reposo (línea de base) y controlar cuando esta actividad se va alejando de la línea de base, variando la distribución de los distintos tipos de eventos o la aparición de nuevas familias, así como la relación con otros fenómenos.

### **2.3.5.1 Geófonos.**

Un geófono es un sensor que nos proporciona información sobre el movimiento del suelo, hoy en día los más utilizados son los geófonos electromagnéticos, aunque cada vez son más las realizaciones que utilizan otros tipos de sensores para convertir el movimiento en una señal eléctrica. Las señales sísmicas cubren una banda de frecuencias muy amplia, desde las fracciones de mili hertz para los modos de oscilación normales de la Tierra hasta los cientos de hertz en prospección sísmica. Siguiendo la clasificación tradicional, tenemos sensores de corto periodo que trabajan con períodos inferiores a pocos segundos y largo periodo con periodos propios superiores a diez segundos. Esto es así por existir alrededor de los cinco segundos una señal característica asociada a la interacción del mar y la atmósfera y que es conocida como microsismo. Por ello los sismólogos clásicos eliminaron esta banda para poder trabajar con mayores amplificaciones dada la imposibilidad de filtrar los registros directos proporcionados por los instrumentos de registro mecánico. Hoy, la posibilidad de manipular electrónicamente las señales, unido a la mayor dinámica de los sistemas de registro digital, hace posible utilizar instrumentos que cubran esos periodos intermedios.

Cuando hablamos en sismología de instrumentos de banda ancha (BB) nos referimos a aparatos cuya sensibilidad se extiende a la zona de bajas frecuencias. Los sensores de este tipo son precisamente los más costosos. Esto es así por la dificultad de referir el movimiento del suelo a un sistema que no se vea afectado por las vibraciones sísmicas y, como consecuencia de esto, al uso de sensores inerciales. Este tipo de sensores reacciona a la aceleración respecto de un sistema inercial y por tanto son incapaces de detectar componentes continuas de la velocidad y, por supuesto, de desplazamiento. Desde el punto de vista tecnológico, las dificultades tienen su origen en el hecho que los períodos más largos de las vibraciones sísmicas coinciden con los tiempos característicos de una serie de perturbaciones ambientales (cambios de temperatura o presión), y también de las características de ruido interno de los dispositivos electrónicos que llevan asociados. Por otra parte, instrumentos de largo período han sido substituidos en gran medida por los de

banda ancha y participan del alto costo de éstos y a menudo son aún poco robustos, por lo que su uso en campo y en estaciones portátiles está muy limitado (Figura 2.11).

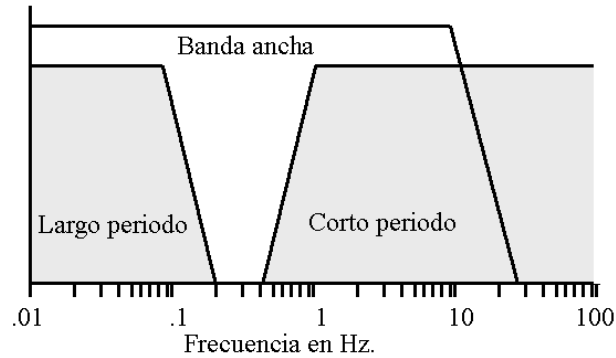


Figura 2.11 *Los sensores utilizados en sismología se clasifican de acuerdo a la banda de frecuencias cubiertas.*

### 2.3.5.2 El geófono electromagnético.

Un geófono electromagnético consiste simplemente en una bobina que se mueve en un campo magnético suspendida de un sistema de resortes. El sistema más sencillo es una masa suspendida de un resorte (Figura 2.12).

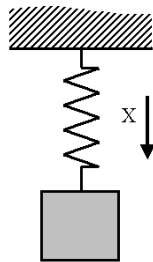


Figura 2.12 *Principio de un sensor sísmico vertical. Una masa suspendida de un resorte. Esta masa permanece en reposo cuando el soporte se mueve verticalmente con periodos inferiores al periodo propio del sistema.*

Un sistema de este tipo responde a la ecuación diferencial:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx$$

La frecuencia propia está relacionada con la constante de recuperación de la suspensión  $k$  y con la masa móvil del sistema  $m$  en la forma:

$$\omega_0 = 2\pi \quad f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

En realidad debemos utilizar sistemas amortiguados que responden a una ecuación diferencial del tipo:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - \delta \frac{dx}{dt}$$

Siendo  $\delta$  un factor de amortiguamiento. En este caso la frecuencia propia varía con el amortiguamiento:

$$\sqrt{\frac{k}{m} - \frac{\delta^2}{4m^2}}$$

Para sistemas sobre amortiguados no existen oscilaciones posibles. Es importante destacar que el aumento del amortiguamiento disminuye la frecuencia propia.

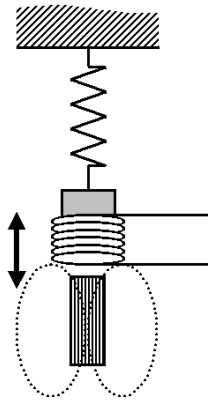


Figura 2.13 *Principio de un geófono electromagnético. La masa suspendida lleva acoplada una bobina que se mueve en un campo magnético no uniforme. A la salida de la bobina obtendremos una señal que para pequeños desplazamientos será proporcional a la velocidad.*

La transformación del movimiento de la masa en una señal eléctrica puede hacerse de muchas maneras. Tradicionalmente se ha utilizado un transductor inductivo como el de la Figura 2.13. La masa móvil incorpora por una bobina que se mueve en un campo magnético. A la salida de la bobina tendremos una señal función de la velocidad con la que se mueve el sistema. Si el campo magnético y la geometría de la bobina son adecuados se puede admitir que para valores pequeños del desplazamiento la señal es proporcional a la velocidad de la masa.

### 2.3.5.3 Equivalente eléctrico del geófono electromagnético.

Un geófono electromagnético se puede representar mediante un circuito analógico utilizando componentes pasivos (R L C) y una fuente de tensión para representar el movimiento del suelo. Con ella se encuentra un circuito equivalente del geófono en el

sentido de que la ecuación que lo describe es formalmente idéntica a la de éste, cambiando las variables. En el circuito propuesto C1 representa la masa móvil, L1 equivale a la constante de recuperación de la suspensión, R1 el amortiguamiento en circuito abierto, R2 la resistencia eléctrica de la bobina, L2 la inductancia eléctrica propia de la bobina y R3 la resistencia externa de amortiguamiento. Este modelo es muy útil para diseñar el circuito del preamplificador, ya que se puede integrar sin dificultad en las técnicas habituales de diseño electrónico (ver figura 2.14).

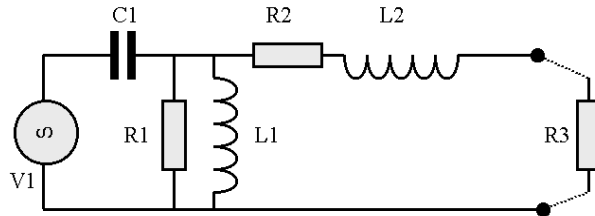


Figura 2.14 La analogía se establece entre el sistema de ecuaciones del movimiento de la masa del sensor, con sus equivalentes del circuito eléctrico.

$$F = M \frac{dv}{dt} \leftrightarrow i = C \frac{du}{dt}$$

$$F = k \int v dt \leftrightarrow i = \frac{1}{L} \int u dt$$

$$F = Dv \leftrightarrow i = \frac{1}{R} u$$

$$x \left( S^2 + \frac{D}{M} S + \frac{k}{M} \right) = z S^2$$

$$u_o \left( S^2 + \frac{1}{RC} S + \frac{1}{LC} \right) = u_o S^2$$

En general, el fabricante nos suministra la información básica del sensor, tal como su frecuencia propia, amortiguamiento en circuito abierto, constante de transducción y masa móvil. En general también nos proporcionan el valor de la resistencia y de la autoinducción de la bobina sensora R2 y L2. En caso contrario se puede medir directamente bloqueando la masa móvil y utilizando la instrumentación habitual de un laboratorio electrónico.

Si G es la constante de transducción del geófono (en V/(cm/s)) y la masa del geófono (en gramos) es m podemos introducir C1 (faradios) y L1 (henrios) haciendo:

$$C1 = \frac{M}{G} \quad L1 = \frac{1}{\omega_0^2 C1}$$

El amortiguamiento en circuito abierto  $\alpha_0$  determina el valor de R1

$$R1 = \frac{\omega_0 L1}{2C_0}$$

La frecuencia propia de un circuito LC es:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$$

Es normal que se obtengan valores muy elevados para  $C_1$  y  $L_1$ , ya que las frecuencias que entran en juego son muy bajas (1 Hz a 10 Hz) con respecto a los valores que se utilizan habitualmente en la electrónica práctica (superiores a 50 Hz). Para un geófono del tipo habitualmente utilizado, como es el Mark L28 se tiene: Frecuencia propia  $f_0 = 4.5$  Hz. Resistencia de la bobina  $R_c = 410 \Omega$ . Amortiguamiento en circuito abierto  $\alpha_0 = 0.7$ . Constante de transducción  $G = 0.304$  V/(cm/s). Masa móvil 23 g. Con éstos valores el circuito analógico es:  $L_1 = 50$  H.  $C_1 = 25 \mu\text{F}$  y  $R_1 = 1$  k $\Omega$ .  $L_2$  es inapreciable a efectos prácticos por debajo de 200 Hz. Un geófono Geo Space GS11 posee un amortiguamiento mucho menor en circuito abierto (0.3), siendo las otras características muy similares  $L_1 = 46$  H.  $C_1 = 26 \mu\text{F}$  y  $R_1 = 2.3$  k $\Omega$ .



## 2.4 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

El circuito que se ha propuesto para realizar las funciones de monitoreo en el volcán de San Salvador está compuesto de varias etapas que se aprecia en un diagrama de bloques como en la figura 2.15. Estas etapas constituyen el diseño de la tarjeta encargada de tomar las señales eléctricas, convertirlas de analógicas a digitales y posteriormente enviarlas por un medio de transmisión inalámbrico hacia la estación base que se encarga de analizar e interpretar cada uno de los datos tomados en el punto remoto.

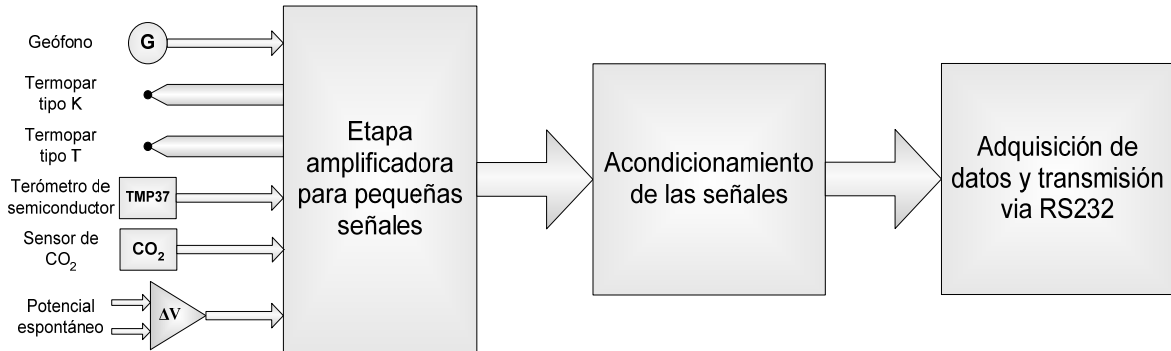


Figura 2.15 *Diseño del sistema de monitoreo que se implementa como propuesta de solución para la toma de muestras que son analizadas. A la izquierda observamos la etapa de los sensores que están conectados con la etapa amplificadora que se encarga de elevar el nivel de las señales a un valor más apropiado para su lectura. Justo después de la etapa de amplificación se encuentra la etapa de acondicionamiento de señal, que desplaza las señales dentro del rango permitido por la última de las etapas que es la que se encarga en sí de la adquisición de los datos.*

Las etapas que componen el diseño comenzando de izquierda a derecha en la figura 2.15 son; Etapa de los sensores, etapa amplificadora de pequeñas señales, etapa de acondicionamiento de las señales y finalmente la etapa encargada de tomar las lecturas de las señales eléctricas y enviarlas hacia los dispositivos encargados de transportar los datos de forma inalámbrica hasta el lugar donde son analizadas.

### 2.4.1 Etapa de sensores

Esta etapa está formada por varios transductores que se encargan de convertir el fenómeno físico deseado a una señal eléctrica que luego es tratada por los dispositivos electrónicos. Esta etapa es de bastante importancia en el diseño, pues si uno de los sensores está descalibrado, desconectado ó presenta algún defecto, los datos que de éste se reciban no tienen ningún valor de análisis. Además por ser la etapa que hace contacto directamente con los fenómenos físicos a monitorear, no se permite que exista ningún fallo en ésta. Estos sensores han sido explicados de forma general en éste capítulo en la sección 2.3.

### 2.4.2 Etapa amplificadora

Debido a la naturaleza de algunos sensores, estos cuando realizan una conversión del fenómeno físico a una señal eléctrica no brindan del todo una señal que abarque todo el rango deseado por los circuitos encargados de recoger éstas señales para convertirlas al formato que entienda la computadora. Por esta razón se ha implementado una etapa que se encarga de incrementar el nivel de éstas señales y llevarlas hasta el valor máximo permitido por la etapa que toma las lecturas de las señales eléctricas. Para comprender más fácilmente en que consiste el trabajo de ésta etapa, fijémonos en la figura 2.16. La figura 2.16(a) muestra una señal eléctrica original que oscila entre los valores  $+V$  y  $-V$ . Luego que esta señal atraviesa una etapa de amplificación, los valores máximo y mínimo se han modificado en un factor de 2, esto indica que los nuevos rangos de la señal son ahora  $+V'$  y  $-V'$  que son exactamente el doble de los valores  $+V$  y  $-V$  originales respectivamente. Los circuitos eléctricos que componen esta etapa son explicados más adelante en el capítulo 3.

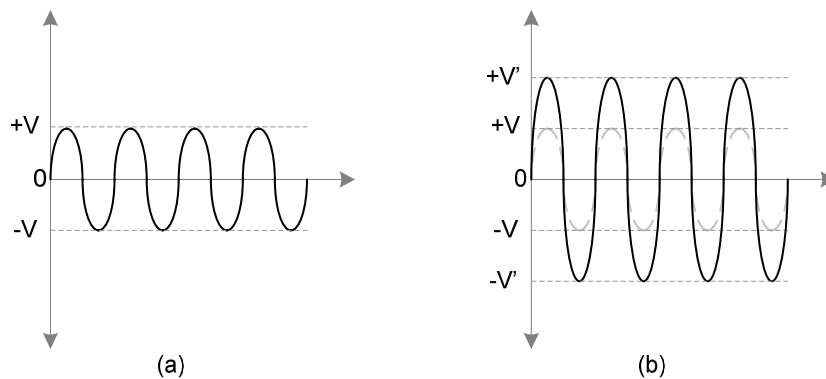


Figura 2.16 Efecto de la amplificación en una señal. La figura (a) muestra una señal original sin amplificación y la figura (b) muestra la señal amplificada con una etapa de ganancia 2.

### 2.4.3 Etapa de desplazamiento de las señales

Esta etapa se encarga de desplazar la señal eléctrica al rango permitido por la etapa de adquisición de datos que básicamente son ADC. Para entender de forma clara cual es efecto de ésta etapa en las señales observemos la figura 2.17 en la cual aparece una señal originada por algún circuito o sensor (Figura 2.17a) y luego en la figura 2.17b aparece la señal desplazada en el eje Y para cubrir el rango permitido por el circuito que la va a muestrear. En otras palabras, luego que la señal a atravesado el circuito de acondicionamiento de la señal, el nuevo valor de referencia de ésta ya no es el eje del tiempo, sino una recta horizontal que pase por el punto  $+V$  y sus nuevos límites son  $V_{\min} = 0$  y  $V_{\max}$ . Los circuitos eléctricos que componen esta etapa son explicados más adelante en el capítulo 3.

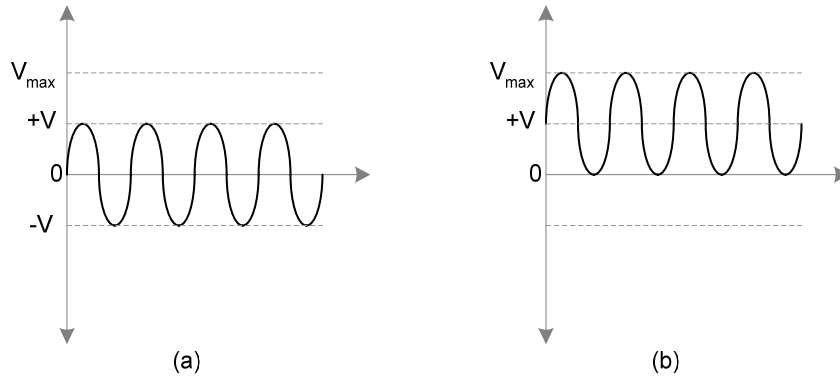


Figura 2.17 La figura (a) muestra una señal eléctrica que no ha sufrido ningún cambio, mientras que en la figura (b), ha sido desplazada hacia arriba sobre el eje de las ordenadas una cantidad  $+V$ .

#### 2.4.4 Etapa de adquisición y procesamiento de datos

Esta etapa es la que se encarga de la lectura, conversión y transmisión de los datos provenientes de los sensores pasando previamente por una etapa de amplificación y una etapa de acondicionamiento de las señales. Esta etapa la constituyen circuitos convertidores de señales analógicas a datos digitales que son los que la computadora puede interpretar. Sistemas basados en CPU como un microcontrolador son los encargados de hacer estos procesos.

#### 2.4.5 Diagrama a bloques del sistema de monitoreo completo

Visto de una forma más completa, el sistema de monitoreo se compone de una serie de etapas que incluyen; adquisición de datos, la telemetría y el sistema de análisis de los datos. Todo esto está representado en la figura 2.18 junto con algunos detalles importantes para asegurar una buena comunicación.

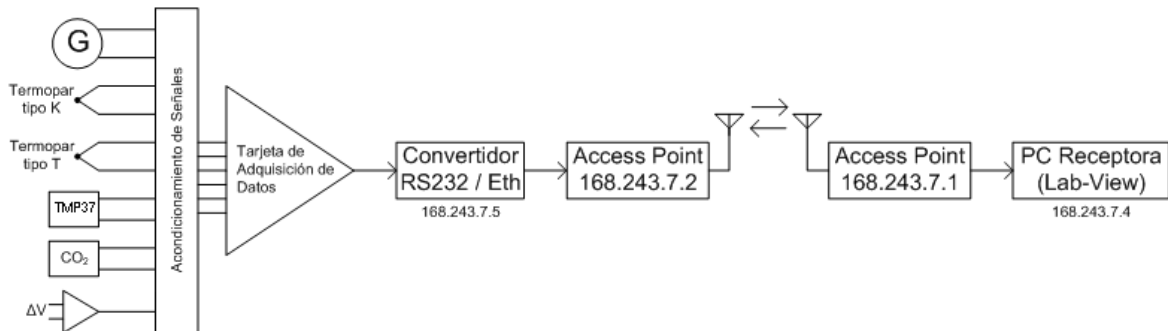


Figura 2.18 Diagrama a bloques del sistema de monitoreo como propuesta de solución.

## 2.5 TELEMETRÍA

Un aspecto importante es el que se relaciona al sistema de comunicaciones que permita la centralización y acceso inmediato a todos los datos disponibles. Actualmente hay un gran desarrollo de tecnologías de telecomunicación, que sin embargo presentan una gran inversión para aplicarlos en regiones de riesgo volcánico moderado o para vigilar volcanes que no están en crisis; sin embargo el estudiar cada una de ellas permite aprovechar las ventajas que ofrecen las distintas tecnologías con un costo razonable. La telefonía móvil o fija, radioenlaces VHF, UHF y *spread spectrum* ó satélite son algunas de estas tecnologías, a las que se debe añadir la conexión a la red INTERNET para el acceso remoto y múltiple de datos.

Las técnicas de transmisión más utilizadas en el seguimiento de la actividad volcánica se muestran en la tabla 2.3. Aquí se muestran las ventajas que cada uno de ellos ofrecen, problemas y susceptibilidad a fallar.

Sistemas de comunicación				
Tipos de enlaces	Baudios	Eficacia	Principales problemas	Fallo en crisis
Línea telefónica	33000	Eficaz.	Costes muy elevados	Sí
Telefonía celular	9600	Poco eficaz.	Costes elevados. No siempre existe cobertura.	Sí.
Cables (pares trenzados)	115000 (RS485)	Muy eficaz en distancias de pocos Km.	Deben instalarse con cuidado para evitar	No
Fibra óptica	1000000	Mayor capacidad de transmisión.	Roturas. Se deben proteger de los animales.	
Radio VHF	4800	Es la tecnología más empleada. Bajo coste.	Muchas interferencias. El espectro está muy saturado. Dificultad de obtener licencias.	No
Radio UHF	33000			
Técnicas spread spectrum	115000 no siempre alcanzable	Nueva tecnología, muy eficaz.	No esta autorizado su uso en todos los países. Elevado requerimiento energético.	No, salvo fallo en la alimentación.
Satélite (continuo)	Depende del precio	Muy eficaz. La capacidad del enlace sólo depende del precio.	Coste prohibitivo en equipos y operación. Elevado requerimiento energético	No, salvo fallo en la alimentación.
Satélite (mensajes)	1200	Muy eficaz.	Muy limitado el volumen de datos.	No
Redes locales	>1000000 no siempre alcanzable	Tráfico de datos en el ámbito del centro de proceso de datos	Debe diseñarse con cuidado, el fallo de un ordenador origina la caída de todo el sistema.	No
Internet	Mucho menor de lo esperado	Transferencia de datos entre investigadores o centros. Económico.	No siempre se puede garantizar la recepción correcta de los datos.	Sí. Sin ninguna duda.

Tabla 2.3 *Tipos de transmisión de datos que se utilizan hoy en día.*

El diseño de una red de comunicaciones para el seguimiento de la actividad volcánica se hace siguiendo los siguientes pasos:

1. Sensores y sistema de conversión analógico digital. Interfaces de comunicación RS232/RS485 y módem.
2. Enlaces con cables.
3. Enlace de radio VHF/UHF ó WI-FI de poca potencia y con un alcance de unos pocos kilómetros. La poca potencia permite que una pequeña batería pueda mantener en funcionamiento el sistema durante un mes. Un pequeño panel solar garantiza la operación del sistema en forma continua.
4. Enlace de radio VHF/UHF ó WI-FI de potencia media y alcance de pocas decenas de kilómetros.
5. Centro de captura de datos. Generalmente está situado cerca del volcán. A este punto llegan los datos procedentes de varios sensores. Una o varias computadores son las que se encargan de mantener un registro temporal y de gestionar la transmisión de la información a la central de control y adquisición de datos.
6. Enlace hasta la central de control y adquisición de datos (GIV-UES).

### **2.5.1 Transmisión por radio VHF/UHF**

La utilización de enlaces punto a punto VH y UHF requiere una visión directa o la utilización de repetidores. Además, el espectro está muy saturado y generalmente no se respetan las frecuencias asignadas. La topografía de las áreas volcánicas activas es muy compleja, lo que dificulta la implementación de redes de comunicaciones. Las grandes alturas, los profundos barrancos y la escasez de vías de comunicación son elementos que originan grandes dificultades y elevan costos de instalación, además del mantenimiento de las estructuras necesarias para el soporte de la comunicación.

Por otra parte, ya que con frecuencia los volcanes se encuentran dentro de zonas naturales protegidas se complica aún más la instalación de las redes de comunicaciones. Sin embargo el uso de enlaces de radio de muy baja potencia, con antenas y paneles solares de pequeño tamaño, hacen que el impacto ambiental sea mínimo, lo que facilita la obtención de los permisos necesarios para la instalación.

### **2.5.2 Transmisión por WI-FI**

Una red de WI-FI usa un radio de frecuencia para comunicarse entre el ordenador y el punto de acceso, usa transmisores de doble banda (o doble sentido) que trabajan a 2.4 Ghz (802.11b, 802.11g) o 5 Ghz (802.11a). Por lo general, el alcance de la antena varía entre 50 y 500 metros de distancia entre el punto emisor y el receptor, dependiendo del tipo de antenas utilizadas. A pesar de esto, la interferencia y los edificios hacen variar el campo de cobertura.

Se escogió este tipo de transmisión como la solución al problema de telemetría por varias razones, pero las de mayor importancia son; su fácil manejo y adaptación al medio, lo relativamente económica que es comparada con las demás tecnologías, la factibilidad de incorporar otros servicios a futuro y la poca saturación de su espectro de frecuencia.

### **2.5.2.1 Redes WLAN**

En los últimos años se ha producido un crecimiento en lo referente al desarrollo y aceptación de las comunicaciones móviles y en concreto de las redes de área local (Wireless LANs). La función principal de este tipo de redes es proporcionar conectividad y acceso a las tradicionales redes cableadas, como si de una extensión de éstas últimas se tratara, pero con la flexibilidad y movilidad que ofrecen las comunicaciones inalámbricas.

El momento decisivo para la consolidación de estos sistemas fue la conclusión del estándar IEEE 802.11, el cual ha sufrido diferentes extensiones para obtener modificaciones y mejoras. De esta manera, tenemos las siguientes especificaciones:

- 802.11 Especificación para 1-2 Mbps en la banda de los 2.4 GHz, usando salto de frecuencias (FHSS) o secuencia directa (DSSS).
- 802.11b Extensión de 802.11 para proporcionar 11Mbps usando DSSS.
- Wi-Fi (Wireless Fidelity) Promulgado por el WECA para certificar productos 802.11b capaces de interoperar con los de otros fabricantes.
- 802.11a Extensión de 802.11 para proporcionar 54Mbps usando OFDM.
- 802.11g Extensión de 802.11 para proporcionar 20-54Mbps usando DSSS y OFDM. Es compatible hacia atrás con 802.11b. Tiene mayor alcance y menor consumo de potencia que 802.11a.

Una red de área local inalámbrica se define como a una red de alcance local que tiene como medio de transmisión el aire. Por red de área local entendemos una red que cubre un entorno geográfico limitado, con una velocidad de transferencia de datos relativamente alta (mayor o igual a 1 Mbps tal y como especifica el IEEE), con baja tasa de errores y administrada de forma privada. Por red inalámbrica entendemos una red que utiliza ondas electromagnéticas como medio de transmisión de la información que viaja a través del canal inalámbrico enlazando los diferentes equipos o terminales móviles asociados a la red. Estos enlaces se implementan básicamente a través de tecnologías de microondas y de infrarrojos.

En las redes tradicionales cableadas esta información viaja a través de cables coaxiales, pares trenzados o fibra óptica. Una red de área local inalámbrica, también llamada wireless LAN (WLAN), es un sistema flexible de comunicaciones que puede implementarse como una extensión o directamente como una alternativa a una red cableada. Este tipo de redes utiliza tecnología de radiofrecuencia minimizando así la necesidad de conexiones cableadas. Este hecho proporciona al usuario una gran movilidad sin perder conectividad.

El atractivo fundamental de este tipo de redes es la facilidad de instalación y el ahorro que supone la supresión del medio de transmisión cableado. Aún así, debido a que sus prestaciones son menores en lo referente a la velocidad de transmisión que se sitúa entre los 2 y los 10 Mbps frente a los 10 y hasta los 100 Mbps ofrecidos por una red convencional, las redes inalámbricas son la alternativa ideal para hacer llegar una red tradicional a lugares donde el cableado no lo permite, y en general las WLAN se utilizarán como un complemento de las redes fijas.

### **2.5.2.2 Aplicaciones de los sistemas WLAN**

Las aplicaciones más típicas de las redes de área local que podemos encontrar actualmente son las siguientes:

- Implementación de redes de área local en edificios históricos, de difícil acceso y en general en entornos donde la solución cableada es inviable.
- Posibilidad de reconfiguración de la topología de la red sin añadir costes adicionales. Esta solución es muy típica en entornos cambiantes que necesitan una estructura de red flexible que se adapte a estos cambios.
- Redes locales para situaciones de emergencia o congestión de la red cableada.
- Estas redes permiten el acceso a la información mientras el usuario se encuentra en movimiento. Habitualmente esta solución es requerida en hospitales, fábricas, almacenes.
- Generación de grupos de trabajo eventuales y reuniones ad-hoc. En estos casos no valdría la pena instalar una red cableada. Con la solución inalámbrica es viable implementar una red de área local aunque sea para un plazo corto de tiempo.
- En ambientes industriales con severas condiciones ambientales este tipo de redes sirve para interconectar diferentes dispositivos y máquinas.
- Interconexión de redes de área local que se encuentran en lugares físicos distintos. Por ejemplo, se puede utilizar una red de área local inalámbrica para interconectar dos o más redes de área local cableadas, situadas en dos edificios distintos.

### **2.5.2.3 Configuraciones WLAN**

El grado de complejidad de una red de área local inalámbrica es variable, dependiendo de las necesidades a cubrir y en función de los requerimientos del sistema que queramos implementar podemos utilizar diversas configuraciones de red.

#### **2.5.2.3.1 Punto a punto ó Peer-To-Peer o redes ad-hoc**

La configuración más básica es la llamada de igual a igual o ad-hoc y consiste en una red de dos terminales móviles equipados con la correspondiente tarjeta adaptadora para comunicaciones inalámbricas. En la figura 2.19 mostramos un ejemplo.

Para que la comunicación entre estas dos estaciones sea posible hace falta que se vean mutuamente de manera directa, es decir, que cada una de ellas esté en el rango de cobertura radioeléctrica de la otra. Las redes de tipo ad-hoc son muy sencillas de implementar y no requieren ningún tipo de gestión administrativa.

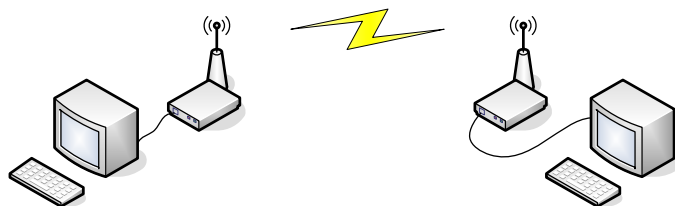


Figura 2.19. Configuración ad-hoc

### 2.5.2.3.2 Enlace entre varias LAN o WMAN

Otra de las configuraciones de red posibles es la que incluye el uso de antenas direccionales. El objetivo de estas antenas direccionales es el de enlazar redes que se encuentran situadas geográficamente en sitios distintos tal y como se muestra en la figura 2.20.

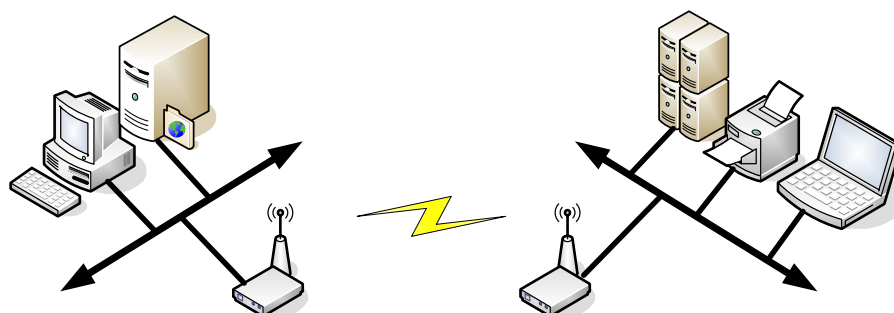


Figura 2.20. Enlace entre varias LAN

Un ejemplo de esta configuración lo tenemos en el caso en que tengamos una red local en un edificio y la queramos extender a otro edificio. Una posible solución a este problema consiste en instalar una antena direccional en cada edificio apuntándose mutuamente. A la vez, cada una de estas antenas está conectada a la red local de su edificio mediante un punto de acceso. De esta manera podemos interconectar las dos redes locales.

### 2.5.2.4 Dispositivos de interconexión.

Existen varios dispositivos que permiten interconectar elementos Wi-Fi, de forma que puedan interactuar entre sí. Entre ellos destacan routers y los puntos de acceso ó AP, para la emisión de la señal Wi-Fi y para la recepción se utilizan tarjetas para conectar a los PC, ya sean internas, como tarjetas PCI o bien USB.



Los puntos de acceso (AP) funcionan a modo de emisor remoto, es decir, en lugares donde la señal Wi-Fi del router no tenga suficiente radio, se colocan estos dispositivos, que reciben la señal bien por un cable UTP que se lleve hasta él o bien que capture la señal débil y la amplifique.

Los router son los que reciben la señal, se encargan de todos los problemas inherentes a la recepción de la señal, donde se incluye el control de errores y extracción de la información, para que los diferentes niveles de red puedan trabajar. En este caso el router efectúa el reparto de la señal, de forma muy eficiente.

## **CAPITULO III**

### **ESTACIÓN MULTIPARAMÉTRICA. DISEÑO PROPUESTO**

#### **INTRODUCCION**

En los capítulos 1 y 2 hablamos acerca del avance que ha tenido nuestro país y la Universidad de El Salvador en el campo de la vulcanología, además analizamos la importancia de tener un sistema de monitoreo eficiente. También hemos hablado de los diferentes métodos existentes para la medición de los fenómenos físico-químicos que son parámetros importantes para la vulcanología. En este capítulo, describimos de forma detallada la operación y uso tanto del hardware como el software que utilizamos en nuestro prototipo de monitoreo volcánico.

El Hardware tiene la finalidad de acoplar la señal analógica de salida de cada sensor y convertirla a dato digital a través de un dispositivo especializado para su procesamiento y posterior envío a la computadora. El Software compuesto por el programa en Lab View se encarga de tomar los datos en una forma ordenada y la decodifica para presentar los resultados del análisis de estos datos correspondientes a las lecturas de los sensores. Estos resultados se presentan en pantalla en forma numérica y grafica, a la vez, el programa en Lab-View se encarga de enviar las señales de inicio de los procesos de medición.

El enlace RF utiliza el protocolo 802.11 (Wi-Fi), el envío de los datos a través de la red inalámbrica lo realizamos utilizando un convertidor serial a ethernet, 2 access point, 2 amplificadores de potencia y 2 antenas Grid a 2.4 GHz. Este protocolo es una alternativa de solución económica para poder monitorear las estaciones del GIV-UES con la ventaja de que permite la telemetría de la estación multiparametrica en forma remota.

### 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA PROPUESTO.

El diseño propuesto como estación multiparamétrica de monitoreo volcánico tiene la capacidad de proporcionar la misma información básica que las estaciones de tipo comercial con la ventaja de que su costo es bajo y además el soporte técnico requerido para su mantenimiento es relativamente simple y el mismo puede ser proporcionado a nivel local por la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES. El dispositivo propuesto consta de cuatro etapas básicas:

- Sensores.
- Circuitos de acoplamiento y procesamiento de datos.
- Módulos de Radio Frecuencia (RF).
- Estación procesadora central.

La figura 3.1, muestra el diagrama de bloques del sistema propuesto, la función de cada uno de ellos se explica a continuación:

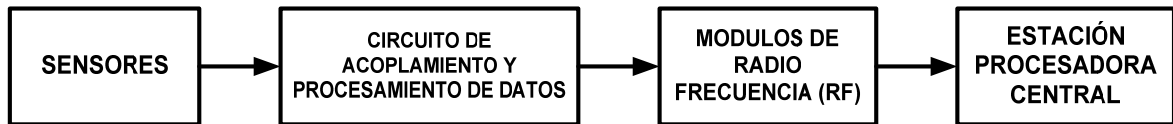


Figura 3.1 *Diagrama de bloques general.*

### 3.2 SENSORES

Es oportuno señalar que los alcances del presente trabajo no contemplaban el diseño y construcción de sensores. Los sensores utilizados fueron proporcionados por el GIV-UES y los mismos están compuestos por; 2 termocuplas tipo K, un analizador de CO<sub>2</sub>, un geófono, un termómetro de semiconductor y 3 electrodos para medición de potencial espontáneo (potencial de tierra).

#### 3.2.1 Termocuplas tipo K.

Una termocupla esta construida con 2 conductores de distinto material unidos en un extremo por un punto fino de soldadura. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los mili voltios, el cual aumenta proporcionalmente con los incrementos de temperatura (ver apéndice I). Las termocuplas K son de bajo costo, físicamente muy robustas y responden a un amplio rango de variaciones de temperatura (desde 180 hasta 1370 °C aproximadamente).

Estos son elementos no lineales y se utilizan para medir la temperatura en ambientes industriales, por lo cual son ideales para utilizarse en ambientes inhóspitos, tal como el encontrado en el monitoreo vulcanológico. Las dos termocuplas usadas tienen como función medir la temperatura del suelo a dos niveles diferentes. Una se introduce a 40 cm.

bajo el nivel del suelo y la otra a 10 cm. En la figura 3.2 se muestra una fotografía de las termocuplas utilizadas en el presente trabajo.

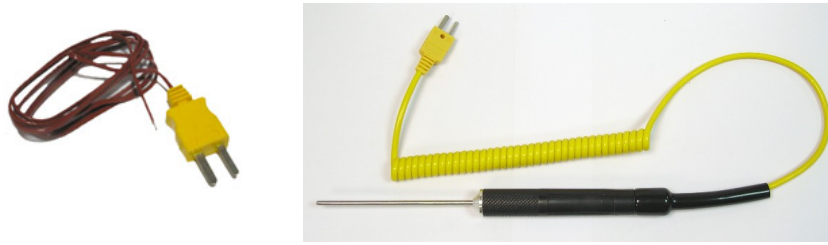


Figura 3.2 *Termocuplas utilizadas para medir la temperatura del suelo*

### 3.2.2 Sensor de Temperatura TMP37

El termómetro de semiconductor TMP37 es un sensor lineal de temperatura que tiene como función medir la variación de temperatura en el aire, este sensor es ideal para registrar este tipo de variaciones, ya que tiene una gran sensibilidad para captar los cambios en la temperatura ambiente, especialmente por su tipo de encapsulado. El sensor utilizado se aprecia en la figura 3.3.

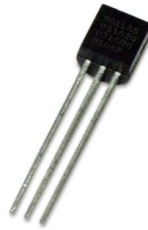


Figura 3.3 *Sensor de Temperatura TMP37*

El TMP37 brinda una salida de voltaje (entre 0 y 5 voltios DC), la cual es proporcional a la temperatura ambiente. Los incrementos de temperatura se dan en cambios de 20 mV/°C. Los pines 1 y 3 del dispositivo se utilizan para su polarización (el pin 1 se conecta a 5V y el 3 a tierra respectivamente). El pin 2 nos da la salida de voltaje proporcional a la variación de temperatura (ver apéndice I).

### 3.2.3 Geófono

Los geófonos al igual que los sismógrafos, son sensores que miden los movimientos de suelo. La medición de los movimientos sísmicos en el sistema se hace a través de un sensor tipo Mark L28 de 4.5 Hz. La figura 3.4 muestra la imagen del geófono utilizado en el sistema.



Figura 3.4. *Geófono Mark L28*

La salida de voltaje analógico brindada por este sensor, varía proporcionalmente al movimiento del péndulo interno del dispositivo (ver apéndice I).

### 3.2.4 Potencial de Tierra

La medición del potencial espontáneo (potencial de tierra) se realiza a través de 3 electrodos de cobre distribuidos en un área de terreno semiplano con poca distancia de separación entre ellos. Uno de los 3 electrodos se coloca como referencia y los otros dos son los encargados de generar las variaciones de potencial. Los electrodos prácticamente son del mismo tipo de barras de cobre utilizadas para la polarización a tierra de redes eléctricas, sin embargo como los voltajes que proporcionan este tipo de redes tienen valores muy pequeños, se envían a una etapa de amplificación antes de que puedan ser convertidas por el sistema. La figura 3.5 muestra la imagen de las barras de cobre que se usan como electrodos para la red de potencial.



Figura 3.5 *Electrodos usados para medir el potencial de tierra.*

### 3.2.5 Sensor de CO<sub>2</sub>

El sensor de CO<sub>2</sub> es el dispositivo LI-840 (el cual se encarga de tomar la lectura de CO<sub>2</sub> y convertirla a un voltaje DC proporcional a dicha lectura). Este elemento se utiliza en conjunto con una cámara de acumulación (ver figura 3.6a), ambos conforman un sistema eficiente para la captura y medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en el área de interés. La cámara es accionada cada hora a petición de la estación base y permanece acumulando el gas por un tiempo no mayor de 3 minutos. La cámara de acumulación tiene una bomba de succión que conecta ésta con el sensor de CO<sub>2</sub> a través de unas mangueras plásticas. Las mangueras llevan el gas desde la fuente de origen hasta el sensor para que éste tome las

muestras necesarias. Al iniciarse el sistema de lectura de  $\text{CO}_2$ , primero se enciende la bomba de succión y una vez activada, la cámara permanece en la posición vertical por un breve tiempo con la finalidad de limpiar cualquier residuo de  $\text{CO}_2$  en el sensor. Luego, la cámara baja y forma un cierre hermético para impedir que haya fugas del gas, permaneciendo durante 2 minutos en esa posición mientras se toman muestras de  $\text{CO}_2$  a una razón de una muestra por segundo que al mismo tiempo van siendo almacenadas. La figura 3.6b, presenta la imagen del sensor de  $\text{CO}_2$  LI-840 que utiliza el sistema (ver apéndice C).



Figura 3.6. La figura (a) muestra la cámara de acumulación, mientras que la figura (b) muestra el analizador de  $\text{CO}_2$  LI-840

### 3.3 CIRCUITOS DE ACOPLA Y PROCESAMIENTO DE DATOS.

Para una mejor comprensión de esta etapa, vamos a analizarla en varias sub-etapas que son:

- Acoplamiento de señales.
- Procesamiento de datos.
- Transmisión de datos.

#### 3.3.1 Acoplamiento de señales.

Una vez obtenidas las señales eléctricas de salida de cada sensor, se necesita llevarlas todas a un mismo rango de variación que pueda ser interpretado por los circuitos posteriores (el circuito encargado de tomar estas señales y procesarlas como datos es el microcontrolador PIC16F877A (ver apéndices I) quien posee internamente un convertidor analógico digital para tomar una muestra de la señal y convertirla en un código binario, de aquí en adelante llamaremos al microcontrolador simplemente PIC). Esta es la función que realiza esta etapa dentro del sistema, en la cual se llevan a cabo dos procesos: amplificación de señales de bajo nivel y desplazamiento de las señales. Estos procesos fueron explicados con anterioridad en el capítulo 2, en las secciones 2.4.2 y 2.4.3. Cabe aclarar en este punto, que no todos los sensores atraviesan por estos procesos ya que tanto el sensor de  $\text{CO}_2$  como el termómetro de semiconductor TM37, brindan a su salida el rango de variaciones que es requerido por la etapa siguiente. Para los restantes sensores, su salida es conectada a una

etapa de acondicionamiento cuya complejidad depende de factores tales como: razón de cambio en la salida del sensor, linealidad del sensor y la máxima salida que generan estos. El rango de voltaje al que se llevan las salidas de los sensores que atraviesan estos procesos oscila entre 0 a 5V.

### 3.3.1.1 Acoplamiento de las Termocuplas tipo K

El principal inconveniente en el uso de estos sensores es la necesidad de la compensación del punto frío, es decir mantener un voltaje igual a cero entre los empalmes de la termocupla y la circuitería externa cuando la temperatura es 0 °C. Para ello, se utiliza el circuito integrado AD595 (ver apéndice I) que ha sido diseñado especialmente para compensar la salida de las termocuplas tipo K.

El circuito básico de compensación lo podemos observar en la figura 3.7. Generalmente, la salida de voltaje de una termocupla tipo K oscila entre los valores  $39 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  y  $42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  para un rango de temperatura de 0 a 100 °C.

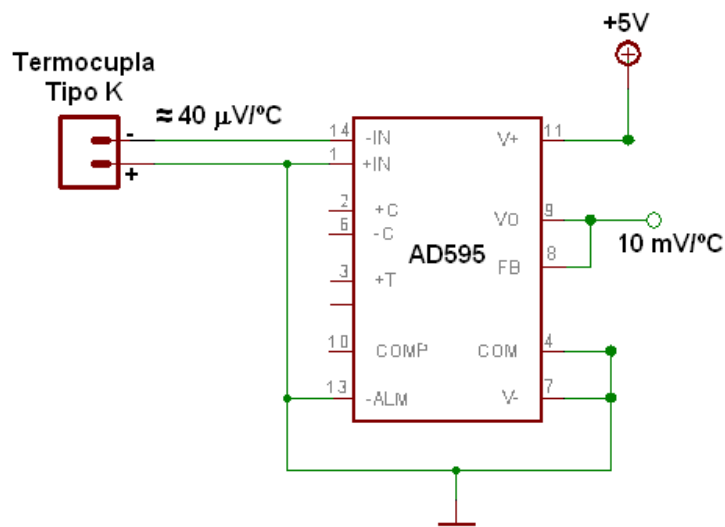


Figura 3.7 Circuito Básico Compensatorio con AD595 para Termocuplas tipo K

El AD595 como ya se dijo, está diseñado para generar una salida de voltaje proporcional al voltaje de entrada. La relación del voltaje de salida con respecto a la temperatura es de  $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , esta relación varía dependiendo de factores externos tales como el diseño de la tarjeta impresa, el tipo de cable utilizado para conectar la termocupla con el AD595 y factores de suciedad en las uniones de los cables. Para lograr el acople apropiado de este sensor con el sistema, se sometió la termocupla tipo K a diferentes temperaturas midiendo en intervalos de  $5^\circ\text{C}$  el voltaje de salida del AD595, esto con el fin de determinar la posible necesidad de un ajuste externo que modificará la ganancia original definida por una resistencia interna de realimentación de  $47 \text{ k}\Omega$ . Los valores obtenidos en esta prueba se muestran en la tabla 3.1:

Temperatura Termocupla tipo K (°C)	Voltaje de salida de Termocupla (mV)	Voltaje de Salida del AD595 (mV)
85	3.474	903
80	3.267	856
75	3.059	806
70	2.851	753
65	2.644	703
60	2.436	654
55	2.230	602
50	2.023	554
45	1.817	501
40	1.612	449
35	1.407	396
30	1.203	346
25	1.000	294

Tabla 3.1. Medición de voltaje de salida de la termocupla vs voltaje del AD595

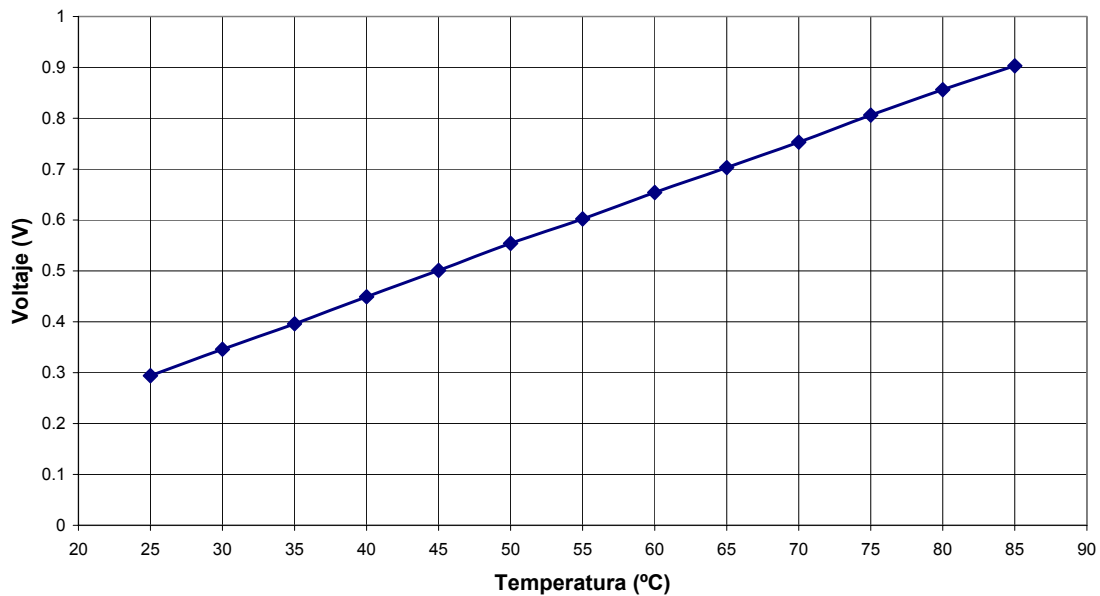


Figura 3.8. Gráfica de voltaje de salida del AD595 vs. Temperatura de la termocupla

Al graficar los puntos de la columna 1 y columna 3 de la tabla 3.1, obtenemos la curva mostrada en la figura 3.8, la cual nos muestra que existe una desviación lineal de 50 mV con respecto al voltaje ideal del AD595. Por ejemplo, podemos observar que en el punto donde la temperatura vale 50 °C, el voltaje de salida del AD595 es de 554 mV. Este valor representa una temperatura medida de 55 °C y por lo tanto, se hace necesario realizar un ajuste externo que puede ser por hardware (modificando el circuito) ó por software (compensar el valor obtenido, ya sea sumando o restando un valor constante). El ajuste ó



corrección por hardware implica cambiar una resistencia externa que modifique la ganancia original del AD595. La corrección vía software se hace a través del programa en Lab View en el cual se restará del valor original, los 5 °C de variación. Esta última alternativa no afecta la exactitud del circuito ya que la desviación presentada por el AD595 es constante, es decir, siempre existe una diferencia aproximada de +5 °C con respecto al valor original para todos los puntos que fueron considerados.

Teniendo en cuenta lo anterior, no hay que perder de vista el hecho que este error se corrige posteriormente utilizando la opción del software. No obstante, se hace pasar esta señal por una etapa amplificadora (constituida por el AD623 mostrado en la figura 3.9) con ganancia de 2 para obtener variaciones de aproximadamente 19.6 mV/°C (ver apéndice I).

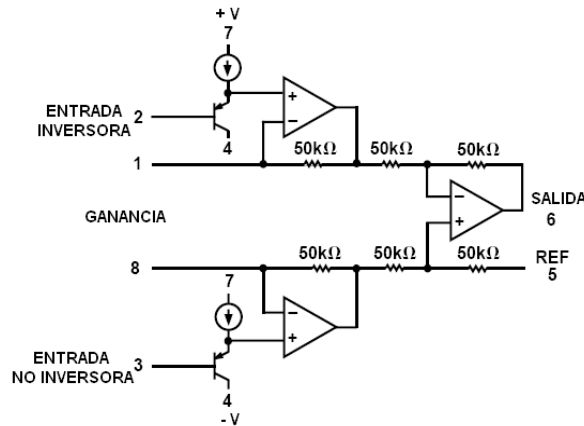


Figura 3.9 Diagrama Interno del OP-AMP AD623

La salida diferencial de este circuito amplificador se rige por la siguiente ecuación:

$$V_o = \left(1 + \frac{100k\Omega}{R_G}\right) V_c$$

Donde:

$$V_c = V_{\text{Entrada no inversora}} - V_{\text{Entrada inversora}}$$

$R_G$  = Resistencia externa entre pines 1 y 8 que define la ganancia del amplificador.

Por lo tanto para obtener una ganancia de 2, el valor de  $R_G$  tiene que ser:

$$G = \frac{V_o}{V_c} = 2$$

$$R_G = \frac{100k\Omega}{(G-1)}$$

$$R_G = \frac{100k\Omega}{(2-1)}$$

$$R_G = 100 k\Omega$$

Finalmente, el circuito de acople de las termocuplas tipo K queda como el mostrado en la figura 3.10.

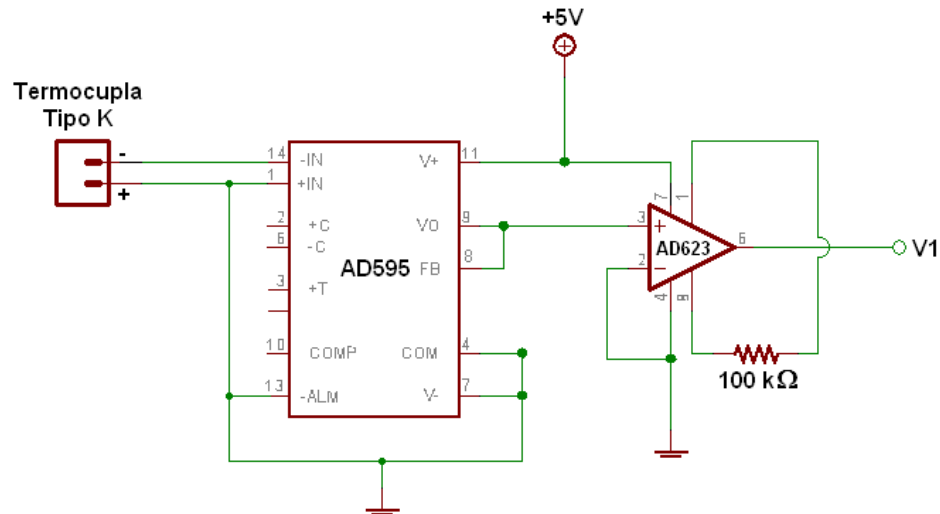


Figura 3.10 *Circuito final acoplador para las Termocuplas tipo K*

Con este nuevo circuito, se realizaron una vez más las pruebas a diferentes temperaturas obteniendo como resultado los datos mostrados en la tabla 3.2:

Temperatura Termocupla tipo K (°C)	Voltaje de Salida V1 (V)
85	1.809
80	1.737
75	1.628
70	1.528
65	1.413
60	1.321
55	1.216
50	1.124
45	1.02
40	0.911
35	0.795
30	0.697
25	0.594

Tabla 3.2. *Resultados obtenidos con el circuito de de acople para las termocuplas tipo K.*

### 3.3.1.2 Acoplamiento del sensor de temperatura TMP37

Este sensor, tal como se ha planteado, es ideal para mediciones de temperatura ambiente. Para el caso de este sistema, el sensor capta variaciones en el rango de 15°C a 35°C (ver apéndice I).

Este sensor está utilizando la misma referencia de voltaje que el ADC interno del PIC y por esta razón genera en su terminal de salida variaciones desde 0 hasta 5V DC a una razón de cambio de 20mV/°C. Por este motivo, éste sensor no necesita un circuito de acople y la salida de éste, está conectada directamente a uno de los canales de entrada analógicos del PIC. La figura 3.11 muestra el circuito esquemático de polarización del sensor y su terminal de salida, el capacitor de 10 µF se utiliza para minimizar las señales de ruido generadas por el entorno y que afecten de alguna manera su potencial de salida.

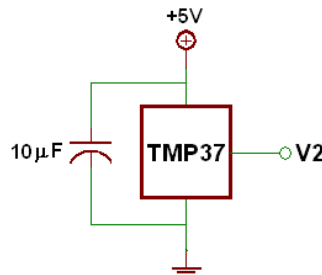


Figura 3.11 *Sensor Lineal de Temperatura TMP37*

Al igual que con las termocuplas, se realizaron una serie de pruebas a diferentes temperaturas con el fin de determinar el nivel de exactitud de este sensor. Los resultados obtenidos de estas pruebas son los que se muestran en la tabla 3.3.

Temperatura del Entorno (°C)	Voltaje de Salida del TMP37 (V)	Voltaje Ideal del TMP37 (V)	Desviación (V)
35	0.725	0.700	0.025
34	0.705	0.680	0.025
33	0.689	0.660	0.029
32	0.671	0.640	0.031
31	0.657	0.620	0.037
30	0.634	0.600	0.034
29	0.614	0.580	0.034
28	0.597	0.560	0.037
27	0.581	0.540	0.041
26	0.565	0.520	0.045
25	0.553	0.500	0.053
24	0.536	0.480	0.056

Tabla 3.3 *Medición de voltaje a la salida de TMP37*

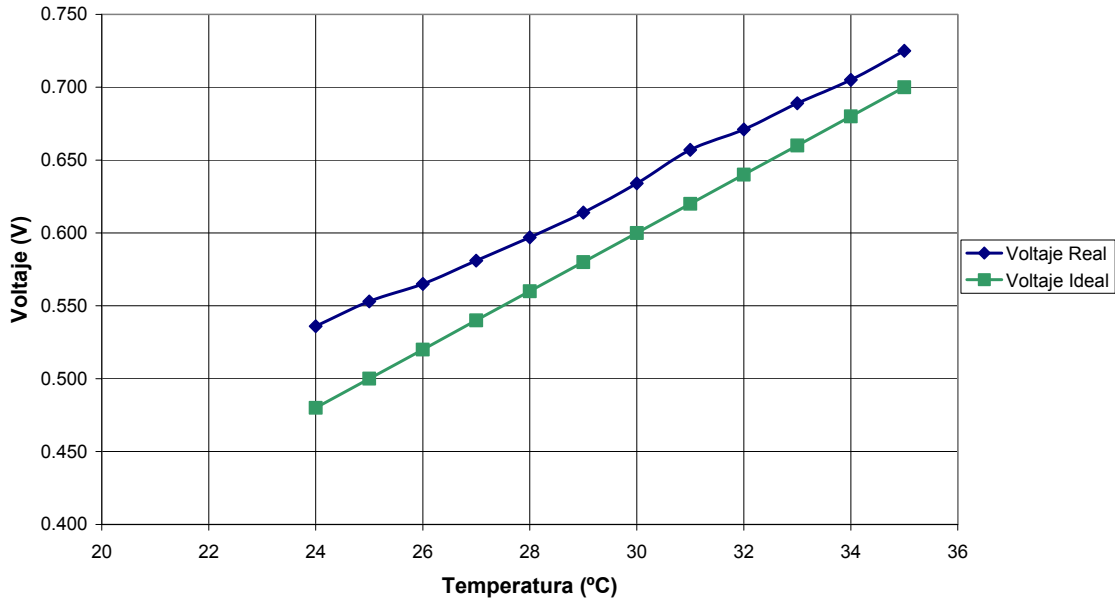


Figura 3.12 Gráfica de la relación entre el voltaje de salida real e ideal del TMP37

En la figura 3.12 se observa dos curvas, la primera resulta al graficar las columnas 1 y 2 de la tabla 3.3, ésta representa el voltaje real de salida. La segunda se obtiene al graficar las columnas 1 y 3 de la tabla 3.3, la cual representa el voltaje ideal a la salida. De las dos curvas presentadas en la grafica observamos que este sensor tiene una desviación promedio de 37 mV en el rango medido de 25°C a 35°C, esta desviación la interpretamos como una diferencia de 2°C constantes entre el valor real y el valor ideal en el intervalo de 25°C a 35°C. De igual forma como se hace la corrección de éste error en las termocuplas tipo K, la corrección para éste sensor también se hace vía software en el programa de Lab-View.

### 3.3.1.3 Acoplamiento del Geófono Mark L28 de 4.5 Hz

El Geófono como sensor de movimientos del suelo no necesita circuito de polarización, pues el mismo genera una diferencia de potencial entre sus dos terminales al detectar vibraciones de la superficie.

El acoplamiento del Geófono con el ADC interno del PIC se realiza mediante un filtro pasivo RC de primer orden pasa bajo, que tiene una frecuencia de corte del orden de los 10 Hz y una etapa posterior de amplificación con ganancia 10 construida con un AD623 como el de la figura 3.9. El circuito de acoplamiento del geófono con el canal analógico de entrada del PIC se muestra en la figura 3.13.

El cálculo de los valores de la resistencia (R) y capacitor (C) se realiza utilizando la fórmula para un filtro RC pasa bajo.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Si consideramos la frecuencia de corte igual a 10 Hz y un capacitor de 1 $\mu$ F, el valor de la resistencia corresponde a:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

$$R = \frac{1}{2\pi * 10 * 1 \times 10^{-6}}$$

$$R = 11 \text{ k}\Omega$$

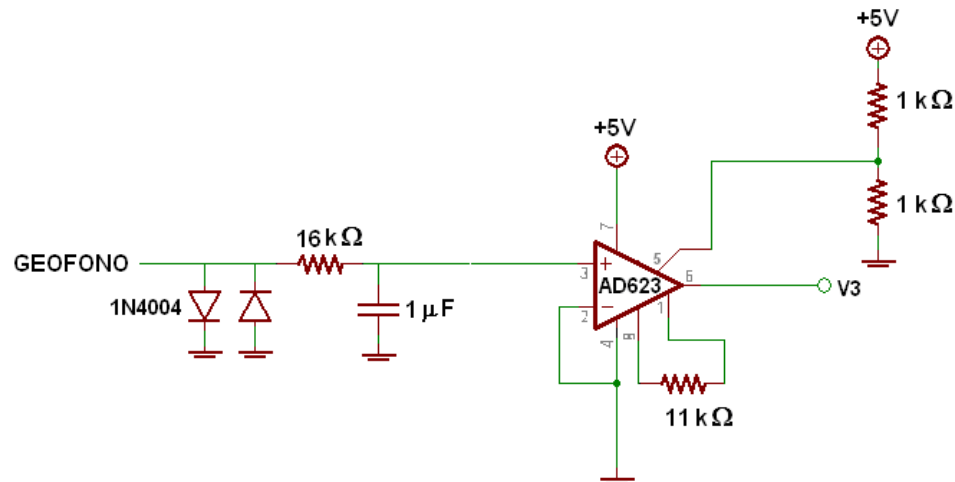


Figura 3.13 Circuito de filtrado y amplificación para la señal del Geófono

La salida filtrada del geófono antes de ser enviada al PIC, se desplaza a un nivel de voltaje de 2.5V DC. Es decir, la señal emitida por el geófono oscila sobre un eje de referencia horizontal que corta al eje de las ordenadas en 2.5V. Esto se hace para no perder información de la parte negativa de la señal.

### 3.3.1.4 Acoplamiento de la señal de CO<sub>2</sub>

El sensor de CO<sub>2</sub> LI-840 es del tipo espectrométrico, significa que para medir las partículas por millón (ppm) en una muestra de CO<sub>2</sub> se basa en la absorción que de éste cuando atraviesa un haz de luz infrarroja. El valor de la señal eléctrica que representa la concentración instantánea en el gas se envía a través de dos terminales a un canal del ADC interno del PIC, quien se encarga de convertir esta señal en un valor binario de 8 bits y almacenarlo temporalmente en su memoria interna.

Para que el sensor funcione adecuadamente, se requiere una tensión de polarización de +12V DC la cual es aplicada a los pines 1 y 2 del sensor. No se necesita un circuito de acople para este sensor ya que su salida varía linealmente de 0V a 5V DC, la cual se acopla perfectamente al rango de entrada permitido por el ADC interno del PIC.

### 3.3.1.4.1 Cámara de acumulación de CO<sub>2</sub>

Para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en un intervalo de tiempo determinado, se diseñó una cámara de acumulación metálica cubierta con una capa protectora que impide su corrosión y deterioro en el ambiente inhóspito donde se encuentra (mostrada en la figura 3.6a). Sin embargo, para llegar hasta ese diseño, se pasó por varias etapas, una de las cuales incluyó la construcción de un prototipo poco eficiente y que requería una fuente de alimentación robusta pues demandaba bastante potencia (este diseño que se construyó al principio, se muestra en la figura 3.15). Este diseño presentaba muchos inconvenientes pero los de mayor relevancia fueron los siguientes:

- Poca portabilidad debido a su tamaño y peso.
- Un motor que operaba con corriente nominal de 3 A.
- No poseía una base fija que permitiera el cierre hermético de la cámara de acumulación.
- El sistema mecánico de conexión entre el brazo que sostiene la cámara y el motor que daba su movimiento hacia abajo y hacia arriba era una cadena que se encontraba muy alejada del eje del brazo, lo que provocaba un gran torque al momento de hacer un movimiento y por lo tanto, más corriente.
- Los detectores de posición del brazo, se dañaban con facilidad debido a la fuerza que éste ejercía al activarlos.



Figura 3.15 *Primer diseño de la cámara de acumulación de CO<sub>2</sub>.*

El diseño de la cámara, pasó por otra etapa, que si bien no se construyó fue pensado como un diseño alternativo para solucionar todas las dificultades obtenidas en el diseño anterior. Este sistema consistía más o menos en implementar una cámara de acumulación sobre una base metálica, la cual sería controlada por pistones del tipo eléctricos ó en el peor de los

casos pistones de aire ó hidráulicos. Las dificultades para la construcción de este sistema fueron:

- No había pistones del tipo eléctrico en el país, y los que encontramos en internet no ofrecían el rango de movimiento necesario para el sistema pensado.
- Los pistones del tipo hidráulico necesitan una bomba que les inyecte el fluido a éstos para que funcionen. Esta bomba necesita una potencia considerable para operar y presentaba una carga adicional al sistema de alimentación de la estación multiparamétrica.
- Los pistones de aire, al igual que los pistones hidráulicos, necesitan otro sistema que inyecte aire en ellos para que funcionen (un compresor). Y por razones similares de potencia, no se optó por ninguno de estos tres métodos de movimiento.

Finalmente logramos diseñar un sistema más eficiente que utiliza un motor de crico de vehículo que consume poca potencia (4 W con corriente con voltaje y corriente nominales de 0.8 A y 12 V DC respectivamente), permite el movimiento completo de la cámara de acumulación y además pudo ser fijado de manera práctica a la base metálica que al cerrarse impide el escape de CO<sub>2</sub>. Este sistema fue el que se utilizó para las pruebas de campo y es el que se ha mostrado ya en la figura 3.6a. Su diseño se basó en el de la figura 3.16.

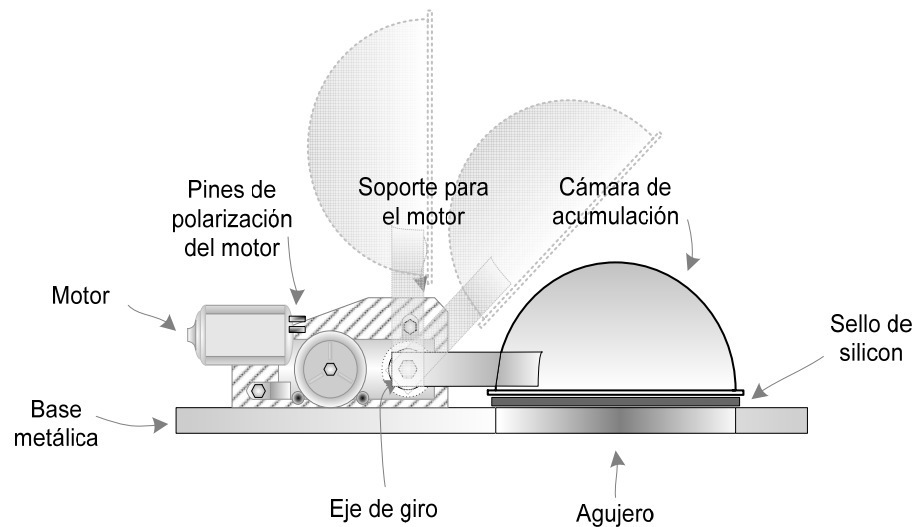


Figura 3.16 *Diseño final de la cámara de acumulación.*

Para el funcionamiento de la cámara de acumulación de gas se utilizó una etapa de potencia manejada por el PIC, quien a su vez se encarga de encender y apagar la bomba de succión que extrae el gas desde la cámara y lo lleva al sensor y viceversa.

La etapa de potencia ha sido diseñada con transistores que operan como interruptores. La base de los transistores está conectada a los pines de control del PIC el cual genera estados lógicos (con cero se pone el transistor en corte y con 1 se pone en saturación). Cuando un transistor está en saturación, polariza la bobina del relé al que está conectado, cerrando los contactos de éste y permitiendo que se maneje la corriente necesaria para mover el motor ó

encender la bomba según sea el caso. Cuando un transistor está en corte, sus contactos permanecen abiertos debido a que las bobinas no están energizadas.

En las figuras 3.17 y 3.18 se muestran los diagramas esquemáticos de los circuitos eléctricos de las etapas de potencia que controlan el motor y la bomba respectivamente.

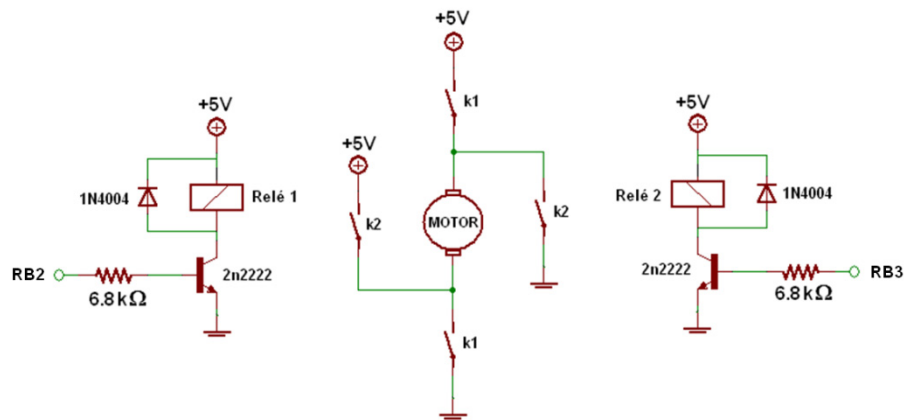


Figura 3.17 Etapa de potencia del motor

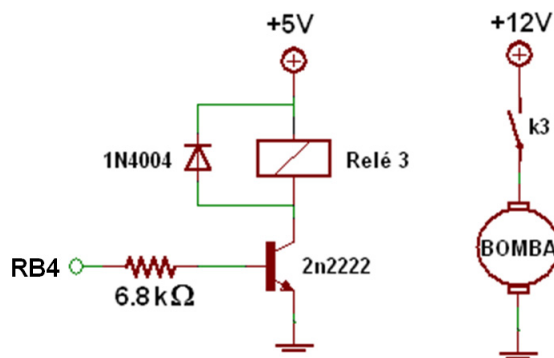


Figura 3.18 Etapa de potencia de la bomba.

### 3.3.1.5 Acoplamiento de la señal de potencial de tierra

La señal analógica generada por los tres electrodos que conforman la red de potencial espontáneo, varía con los siguientes factores: el tipo de superficie, la temperatura ó la humedad de ésta y la distancia de separación entre los electrodos. Para conocer el rango de variación de esta red, se hicieron pruebas utilizando dos electrodos de cobre colocados a



diferentes distancias entre sí. El resultado de la prueba fue un valor que oscilaba entre los 50 a 150 mV a distancias de separación de 1 a 3 m entre ambos electrodos.

Como se puede observar, el rango de variación se encuentra comprendido en el orden de los mili voltios. Este dato se amplifica con el propósito de abarcar todo el rango de voltaje que reconoce como entrada el ADC interno del PIC el cual es desde 0V hasta +5V DC. Es oportuno recordar que el dato capturado por el software consta de 8 bits, es decir, el voltaje medido modifica el dato mostrado en pantalla solamente cuando existe una variación de 19.6 mV o múltiplos de éste en la entrada analógica del PIC.

Para lograr que todo lo antes mencionado ocurra, el voltaje generado en los electrodos se amplifica de tal forma que se tenga la siguiente relación 1:19.6, es decir, que cada 1 mV obtenido desde la red de electrodos es amplificado 19.6 veces, con el fin de medir razones de cambio por cada variación de 1 mV. Luego que esta señal es amplificada, pasa por una etapa que la desplaza sobre el eje de las ordenadas a un nivel de voltaje de 2.5 V DC. Esto se hace para evitar la pérdida de datos negativos al igual que en el caso del geófono.

Utilizando nuevamente la fórmula del circuito integrado AD623 para calcular la resistencia de ganancia, se obtiene el siguiente valor:

$$R_G = \frac{100k\Omega}{(G-1)} = \frac{100k\Omega}{(19.6-1)}$$

$$R_G = 5.4 k\Omega$$

Finalmente, el circuito que se utiliza para la medición del potencial espontáneo ó potencial de tierra es el que se muestra en el diagrama esquemático de la figura 3.19.

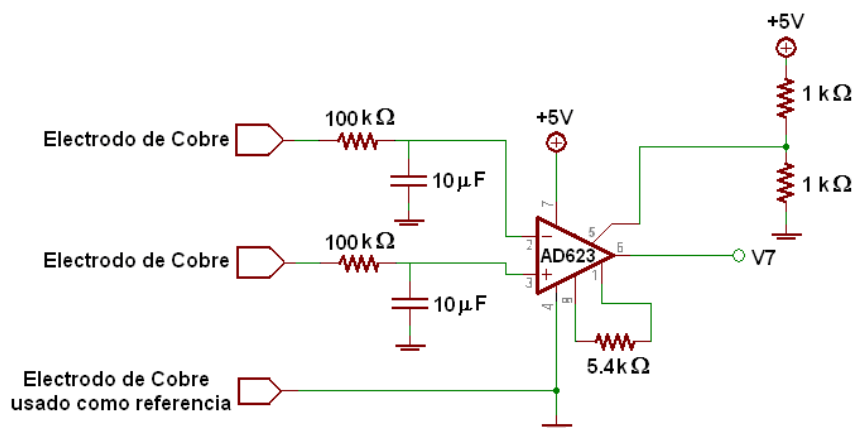


Figura 3.19 Circuito medidor del potencial espontáneo ó potencial de Tierra.

Este arreglo, permite registrar variaciones en un rango de -0.126 V DC a +0.126 V DC del potencial de tierra. Si se quisiera ampliar este rango de medición, lo único que se tendría

que hacer es disminuir el valor de la resistencia de ganancia, el cual afecta de forma proporcional la resolución del circuito medidor.

### 3.3.2 Procesamiento de datos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, aunque sin entrar mucho en detalles, el proceso de tomar una muestra de la señal eléctrica generada ya sea por uno de los sensores ó proveniente de la etapa de acondicionamiento de señales y representarla de tal forma que la computadora receptora pueda entenderla (el formato numérico que las computadoras entienden se conoce como código binario y recibe este nombre debido a que todos sus valores se representan con dos únicos dígitos; el cero lógico y el uno lógico) es el microcontrolador PIC16F877A (ver apéndices A, B e I) del fabricante microchip.

El PIC posee varios módulos internos que se encargan de manipular en forma correcta todos los datos necesarios para el procesamiento y la comunicación con otros dispositivos. Estos módulos se irán explicando conforme nos adentremos más y más en el procesamiento de los datos. Por el momento nos concentramos en el módulo analógico digital ó simplemente ADC, éste es un convertidor con 10 bits de resolución y posee conexiones internas a 8 pines del microcontrolador, con el propósito de que éstas puedan ser multiplexadas y tomar muestras de hasta 8 señales analógicas sin la necesidad de utilizar otros dispositivos externos. Sin embargo, de los 8 canales de entrada analógicos disponibles, solamente se están utilizando 6, lo que nos permitiría en un futuro agregar dos sensores adicionales a los 6 ya implementados. La interconexión entre las señales de los sensores (previamente acondicionadas en un rango de 0 a 5 voltios DC) y el PIC está hecha tal como se muestra en la figura 3.20.

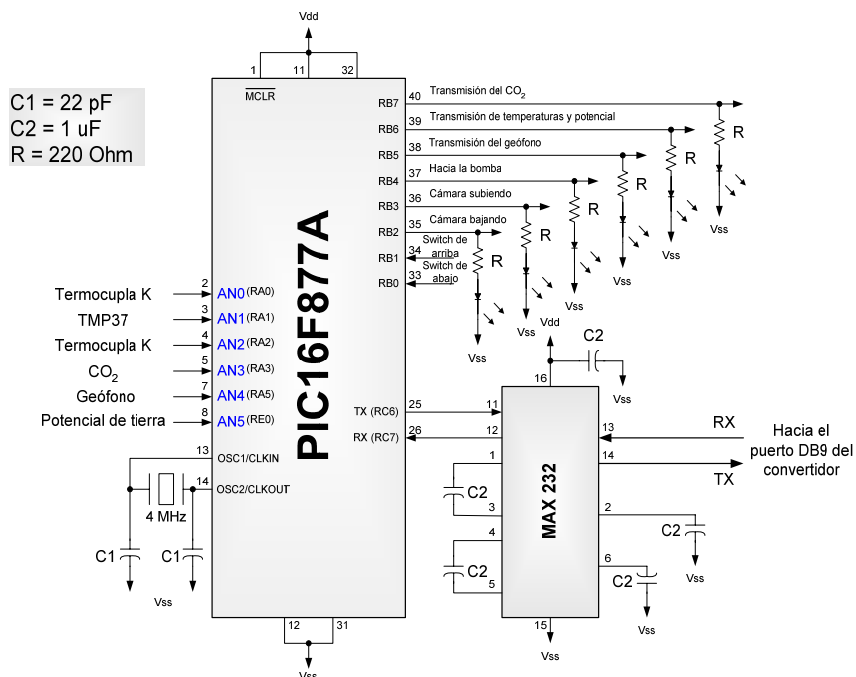


Figura 3.20. Conexión de cada sensor con los pines de lectura del PIC.

Cuando el PIC toma una muestra en uno de sus canales analógicos de entrada (cabe aclarar que no todos pueden ser leídos al mismo tiempo, ya que todos los canales comparten el mismo ADC) le toma un breve tiempo para convertirla a su representación digital (este tiempo se conoce como tiempo de adquisición y es de aproximadamente 20  $\mu$ s) ya que su convertidor interno es del tipo de aproximaciones sucesivas. Una vez convertida la señal en un código binario, éste se almacena temporalmente dentro de 2 registros de la memoria de datos del PIC.

Para tener un monitoreo continuo de los parámetros vulcanológicos, los datos son adquiridos con intervalos de tiempo de 1 hora aproximadamente, con excepción del geófono, el cual se está muestreando a una velocidad estimada de 8 ms para garantizar el número suficiente de muestras, si el rango de frecuencias es de 0.5 Hz a 10 Hz. La adquisición se hace cada hora y el momento exacto en el cual son tomadas las muestras, es determinado por el software creado en el programa de Lab View, el cual lee desde la PC la hora del sistema y genera la orden de activación remota a la estación de monitoreo cuando haya transcurrido una hora en punto. Además, se ha implementado un caso especial en el cual la estación base puede hacer una petición al equipo remoto en cualquier momento, siempre y cuando la petición sea válida. El equipo remoto iniciará inmediatamente la secuencia de toma de muestras para finalmente enviarlas hacia la base. Esto ha sido pensado con el propósito que si son requeridos los datos en un tiempo específico, no tenga que esperarse hasta que transcurra el tiempo restante para completar la hora desde la última transmisión y que no sea necesario cambiar la hora de la PC para poder tener los datos disponibles al momento que sean requeridos. Cabe aclarar que la petición desde la estación base es manual, no así la que se realiza cada hora, la cual se genera de forma automática. Todo esto se ha explicado de mejor manera en la siguiente sección.

### 3.3.2.1 Software para el procesamiento de las señales eléctricas de los sensores.

El procesamiento interno de las señales realizado por el PIC tiene una forma secuencial y lógica de operar desde que se toman las muestras de éstas, hasta que son transmitidas en forma de trama a un punto lejano (una trama es un grupo de n bytes cada uno con propósito específico que viajan a través de un medio a una velocidad constante). Partiendo del hecho que se le ha ordenado a la estación multiparamétrica que tome las muestras en ese momento, el procesamiento interno de los datos se resume con el diagrama de bloques de la figura 3.21. El software que ejecuta todos estos procesos se encuentra en el apéndice A.

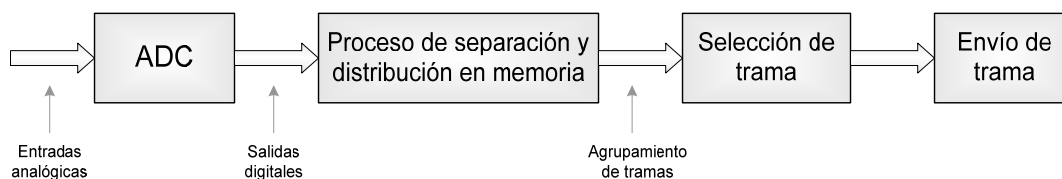


Figura 3.21. *Secuencia del procesamiento y transmisión de datos muestreados.*

Una vez que se le ha ordenado a la estación tomar las muestras (con excepción de las muestras del geófono), el PIC hace una separación interna entre éstas, agrupando las de temperaturas provenientes de las termocuplas tipo K, el sensor de semiconductor TMP37 y la red de electrodos de cobre para la medición del potencial espontáneo, dejando por separado el sensor de CO<sub>2</sub>, pues lleva un proceso diferente a los otros sensores.

El tratamiento que se sigue para las señales provenientes de los sensores de temperatura y potencial de tierra son simplemente los procesos de conversión de analógico a digital seguido del proceso de separación y distribución en memoria donde se copian los bytes obtenidos de la conversión en segmentos de memoria reservados, que el microcontrolador agrupa para formar una sola trama completa con encabezado y cola, la cual queda lista para enviarse cuando la computadora lo solicite.

El tratamiento que se sigue para las señales provenientes del sensor de CO<sub>2</sub>, tiene una variante con respecto a la toma de muestras de los otros sensores, pues se toman una serie de datos para generar una curva que represente el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> conforme aumenta el tiempo. Estos datos se almacenan de forma continua separados en dos grupo, cada grupo dentro de un bloque de memoria específico. La forma en la cual quedan distribuidos los datos en toda la memoria se aprecia en la figura 3.22.

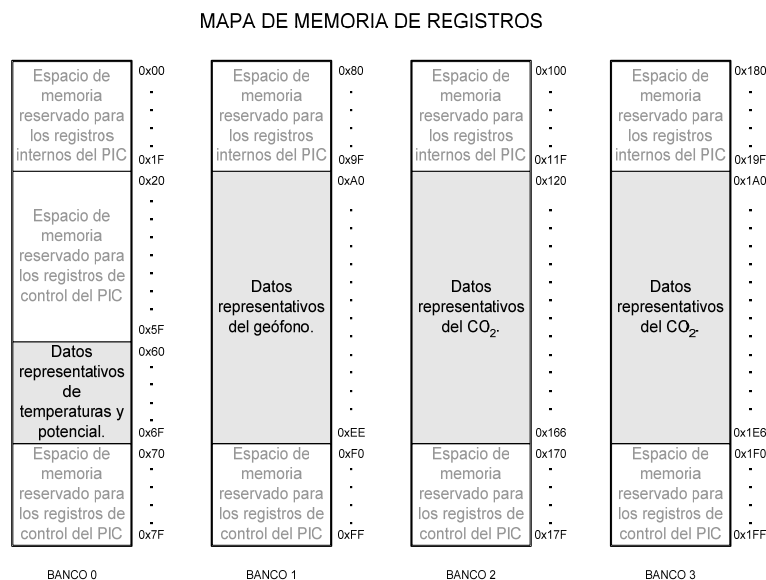


Figura 3.22 Distribución de los datos adquiridos desde los sensores en la memoria.

Para determinar el proceso que se debe ejecutar en cada instante, el PIC se basa en la lógica descrita por el flujograma de la figura 3.23 (el código fuente escrito en lenguaje ensamblador basado en éste diagrama de flujo se muestra en el anexo A). Como se observa el flujograma toma únicamente tres decisiones para saber que hacer, sin embargo esas tres decisiones dependen del estado de los bits dentro del registro CONTROL\_1, así que se procede a explicar el significado de cada uno de éstos bits.

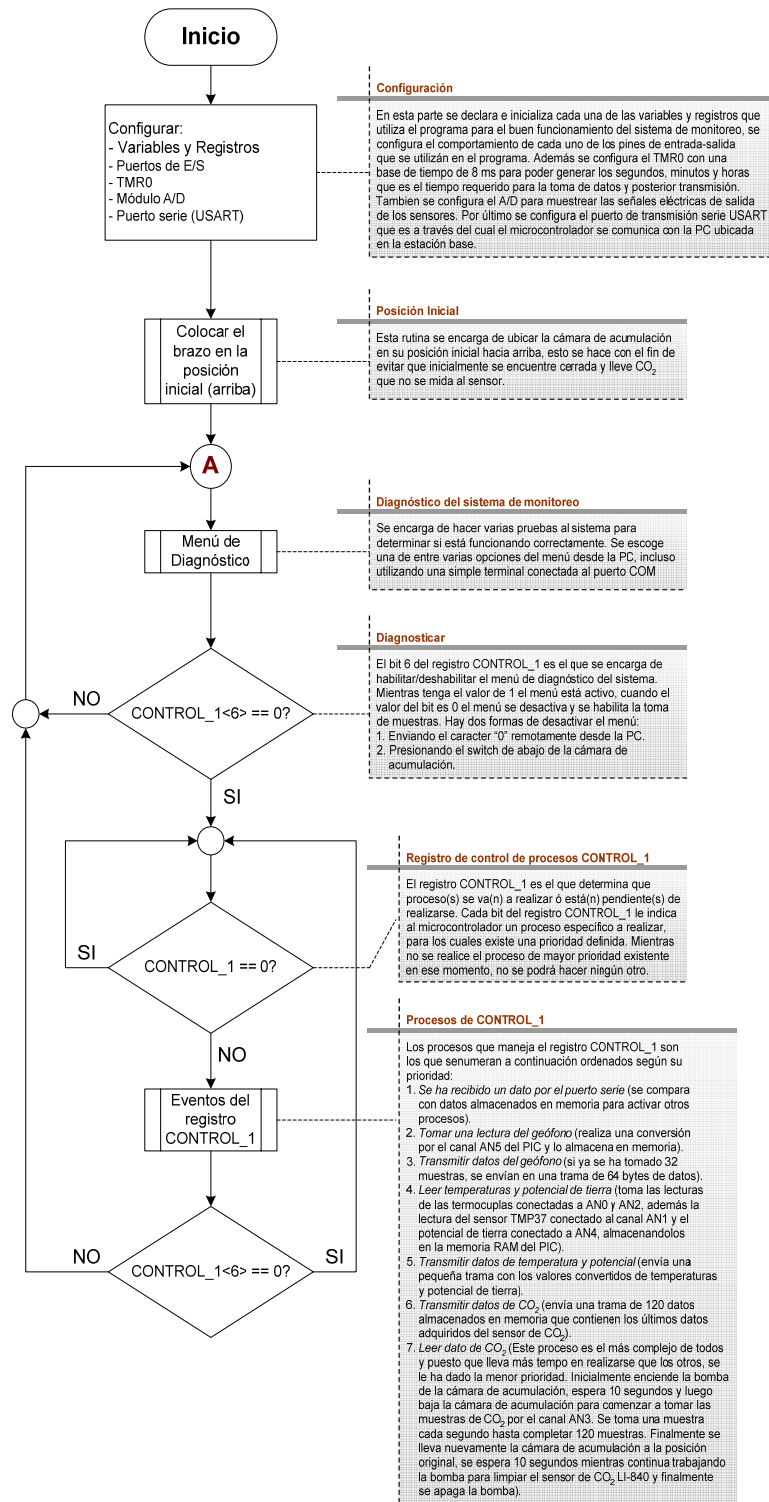


Figura 3.23. Flujograma del programa del microcontrolador para adquisición y manipulación de los datos leídos desde los sensores.

### 3.3.2.2 REGISTROS DE CONTROL

El programa principal del PIC16F877A obedece al estado de dos registros principales de control: CONTROL\_1 y CONTROL\_2. El primero de ellos le dice al PIC que proceso o procesos debe ejecutarse en ese momento (respetando la prioridad establecida) y el segundo de ellos lo utiliza durante el proceso de adquisición de datos de CO<sub>2</sub>.

Para comprender mejor las decisiones que toma el programa durante su ejecución, es conveniente observar el contenido de cada registro y los procesos relacionados a cada uno de sus bits.

#### 3.3.2.2.1 Registro CONTROL\_1

Este registro posee 8 bits para el control de los procesos del sistema de monitoreo (figura 3.24). Como cada proceso está asociado a un bit, significa que en total se manejan 8 procesos a través de este registro. El orden en que se ha asociado los procesos a cada bit del registro, no es el mismo que poseen en prioridad. Si se desea saber en que orden son ejecutados los procesos en el caso que todos los bits estuviesen en “1”, se debe observar el flujograma de la figura 3.23.

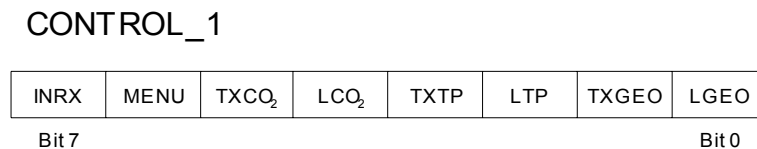


Figura 3.24. Registro de Control 1

A continuación se describe el significado de cada uno de los bits del registro CONTROL\_1.

##### 3.3.2.2.1.1 Bit 0 (LGEO)

Este bit se encarga de indicarle al microcontrolador cuando está en “1” que ya ha transcurrido un tiempo de 8 ms desde que se inició el monitoreo del sistema ó desde que se tomó la última lectura del geófono, por lo que debe procederse a la lectura del canal AN5 para tomar una nueva muestra y codificarla a 10 bits para almacenarla en la memoria RAM del PIC (2 bytes) y posteriormente enviarla por el puerto RS232 cuando se haya completado un total de 32 datos (64 bytes).

Los datos leídos del geófono son almacenados en pares de bytes dentro del banco 1 de la memoria RAM del PIC, comenzando desde la dirección 0x0A4 y terminando 63 posiciones después en la dirección 0x0E3. Una vez llena la memoria con los 32 datos, este proceso pone a “1” automáticamente el bit 1 del registro CONTROL\_1.

### 3.3.2.2.1.2 Bit 1 (TXGEO)

Cuando este bit está en “1”, inicia el proceso que se encarga de transmitir los 32 datos que conforman una trama completa de datos del geófono por el puerto serie del PIC.

Para indicarle a la PC que la trama de datos que se envía es la que corresponde al geófono se agrega un *header(encabezado)* y un *tail(cola)* a la trama los cuales son palabras reservadas que identifica el programa de la PC y los separa de los datos que se encuentran entre ellas. La forma de la trama del geófono se comprende mejor al ver la figura 3.25 que muestra gráficamente el flujo de los datos hacia la PC.

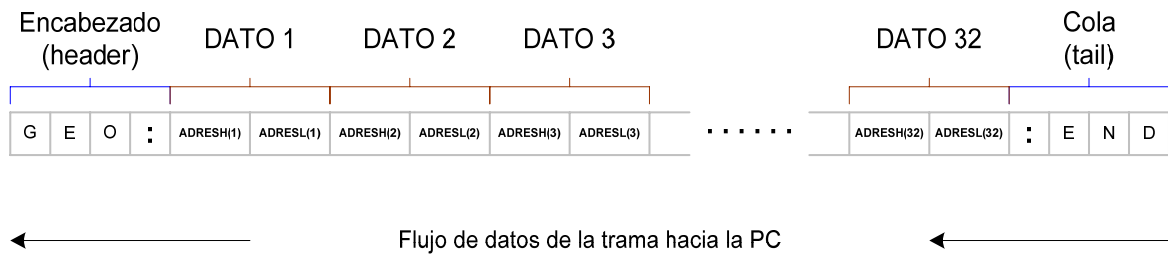


Figura 3.25. *Formato de la trama de datos del geófono.*

### 3.3.2.2.1.3 Bit 2 (LTP)

Cuando este bit está en “1” le indica al microcontrolador que debe leer los canales analógicos AN0, AN1, AN2 y AN4 para tomar las muestras de temperatura y de potencial de tierra, codificarlos a 8 bits para almacenarlos en el banco 0 de la memoria RAM del PIC desde la dirección 0x067 hasta la dirección 0x06A para posteriormente enviarlos a través del puerto RS232.

### 3.3.2.2.1.4 Bit 3 (TXTP)

Cuando el bit TXTP se encuentra en “1”, se genera un proceso de transmisión de los datos de temperatura y potencial almacenados en memoria. Estos datos a diferencia de los datos del geófono, solo ocupan un byte de la memoria cada uno y como solamente se toma un dato cada hora a petición de la PC remota no requiere mucha prioridad. Gráficamente la trama de temperaturas y potencial de tierra enviadas hacia la PC tiene la forma observada en la figura 3.26.

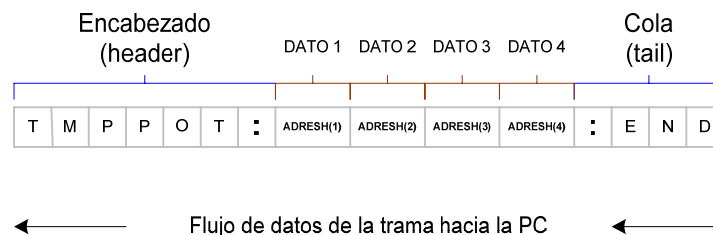


Figura 3.26. *Formato de la trama de los datos de temperatura y potencial.*

En la figura 3.26 se muestra que solamente son 4 los bytes de interés en la trama, puesto que el resto son el header y el tail. El significado de cada uno de los cuatro datos contenidos dentro de la trama es el siguiente:

- > DATO1: Lectura de la termocupla a 10 cm bajo tierra.
- > DATO2: Lectura de la temperatura ambiente con el sensor TMP37.
- > DATO3: Lectura de la termocupla a 40 cm bajo tierra.
- > DATO4: Lectura del potencial de tierra medido entre 3 puntos.

#### **3.3.2.2.1.5 Bit 4 (LCO<sub>2</sub>)**

Cuando este bit se encuentra en “1”, el microcontrolador inicia un proceso para la adquisición de los datos de CO<sub>2</sub>, para el cual se debe hacer ciertos acondicionamientos previos:

- > Encender el sensor de CO<sub>2</sub> LI-840 y la bomba de succión del gas durante 10 segundos aproximadamente, con el fin de darle tiempo al sensor para que se inicialice y limpiar cualquier residuo de gas que haya quedado acumulado de alguna lectura previa u otro tipo de impureza que afecte al valor que se va medir.
- > Llevar la cámara de acumulación a la posición de abajo para encerrar dentro de ésta la emanación de gas que fluye desde la fumarola o fuente de CO<sub>2</sub> mientras el sensor y la bomba están encendidos.
- > Iniciar la toma de muestras de gas durante un período de 2 minutos a una razón de una muestra por segundo (totalizando 120 muestras). Es gas es llevado hasta el sensor LI-840 a través de la bomba de succión y éste realiza la medición del gas proporcionando a su salida un valor analógico de voltaje que equivale a la magnitud de la concentración de gas en la cámara de acumulación. Mientras el tiempo transcurre, el gas va quedando atrapado dentro de la cámara de acumulación dando origen a una mayor concentración de CO<sub>2</sub> en ésta. Estos datos se van almacenando en los bancos 2 y 3 de la memoria RAM del microcontrolador (60 bytes por banco) comenzando desde la posición 0x126 hasta la posición 0x161 para el banco 2 y desde la posición 0x1A6 hasta la posición 0x1E1 para el banco 3.
- > Llevar la cámara de acumulación nuevamente a la posición original (arriba) mientras la bomba continúa encendida para limpiar el sensor de CO<sub>2</sub> LI-840.
- > Dejar la bomba encendida durante 10 segundos aproximadamente, permitiendo que se limpie el sensor.
- > Apagar la bomba y el sensor LI-840 y con los datos almacenados en la RAM, esperar que la PC envíe la petición de éstos para transmitirlos.

#### **3.3.2.2.1.6 Bit 5 (TXCO<sub>2</sub>)**

Este bit se encarga de iniciar el proceso de transmisión de la trama de los datos leídos de CO<sub>2</sub> cuando está en “1”. Este proceso es el que envía la trama de datos más larga y significativa hacia la PC. Gráficamente la trama se puede ver como la mostrada en la figura 3.27.





Figura 3.27. Trama de datos de CO<sub>2</sub> enviada a la PC.

### 3.3.2.2.1.7 Bit 6 (MENU)

Si este bit se encuentra en “1”, se detiene se congelan todos los procesos que se estén realizando en ese momento y el microcontrolador entra al menú de diagnóstico dentro del cual se puede escoger entre las opciones:

1. Probar Sistema
2. Enviar Datos en Memoria
3. Limpiar Datos en Memoria

Cada una de esas opciones se escoge presionando el número correspondiente de la opción si se está trabajando desde una terminal conectada al puerto COM. Desde el programa de Lab View lo que se debe hacer es enviar por el puerto serie el carácter ASCII ‘1’, ‘2’, ‘3’ ó ‘0’ según sea la opción que se desee seleccionar. A continuación se describe los procesos que se realizan para cada opción del menú.

#### 3.3.2.2.1.7.1 Probar Sistema.

Con esta opción el microcontrolador hace una prueba del sistema de lectura del CO<sub>2</sub> que incluye la cámara de acumulación, bomba y sensor de CO<sub>2</sub> para verificar si está trabajando de forma correcta y que el sistema está listo para tomar las muestras que se requiera. Además enciende todos los LED indicadores del estado de las transmisiones para comprobar su estado.

#### 3.3.2.2.1.7.2 Enviar Datos en Memoria.

Esta opción inicia un proceso en el cual se envía hacia la PC las tres tramas de datos con los datos almacenados en memoria hasta ese momento. El orden en que se envían las tramas hacia la PC es el siguiente; primero se envía la trama del geófono, luego se envía la trama de las temperaturas y potencial de tierra para que finalmente sea transmitida la trama de datos de CO<sub>2</sub>.

### 3.3.2.2.1.7.3 Limpiar Datos en Memoria.

Esta opción realiza un proceso de borrado de todos los datos almacenados en memoria. Se debe tener el cuidado de **no** iniciarlo si los datos que se ha registrado en memoria en ese momento no han sido guardados previamente por el sistema si es que tienen valor significativo para el operador del sistema ya que una vez borrados los datos, **no** se pueden recuperar.

### 3.3.2.2.1.8 Bit 7 (INRX)

Este bit maneja el proceso de mayor prioridad en el microcontrolador, ya que obedece a una serie de instrucciones que se pueden generar dependiendo de las peticiones que se hagan remotamente desde la PC. Al recibirse un dato por el puerto serie, se genera una interrupción que almacena en la variable RC\_DATA y coloca a “1” el bit 7 del registro CONTROL\_1 con el propósito de escoger una de las siguientes opciones:

DATO RECIBIDO			PROCESO A REALIZAR
HEXADECIMAL	DECIMAL	ASCII	
3C	60	<	Activar lectura de temperaturas y potencial de tierra
3E	62	>	Activar transmisión de temperaturas y potencial de tierra
40	64	@	Activar lectura de CO2
42	66	B	Activar transmisión de CO2
50	80	P	Suspender monitoreo e ir al menú de diagnóstico

Tabla 3.4. *Procesos que se pueden activar remotamente desde la PC*

### 3.3.2.2.2 Registro CONTROL\_2

El registro CONTROL\_2, mostrado en la figura 3.28, tiene 8 bits y los procesos asociados a cada bit están exclusivamente relacionados con el control de la cámara de acumulación para la lectura de CO<sub>2</sub>.

#### CONTROL\_2

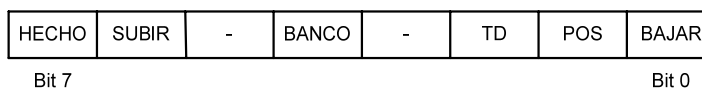


Figura 3.28. *Registro de Control 2*

A diferencia de los procesos del registro CONTROL\_1, éstos no poseen prioridad entre sí, ya que no se ejecutan de forma simultánea sino secuencial. Los procesos asociados a cada bit se describen a continuación:

#### **3.3.2.2.2.1 Bit 0 (BAJAR)**

Cuando este bit se encuentra en “1”, se activa el motor del sistema del brazo con la finalidad de llevar la cámara de acumulación a la posición de abajo para prepararse a tomar las muestras de CO<sub>2</sub>.

#### **3.3.2.2.2.2 Bit 1 (POS)**

Este bit lo utiliza el proceso de adquisición de CO<sub>2</sub> para saber si el brazo ha llegado a la posición de abajo o no y poder tomar las lecturas.

0 -> El brazo está arriba

1 -> El brazo está abajo

#### **3.3.2.2.2.3 Bit 2 (TD)**

Cuando ha transcurrido exactamente un segundo después que la cámara se ha colocado en la posición de abajo, este bit pasa a valer “1” indicándole al microcontrolador que se debe tomar una muestra de CO<sub>2</sub> por el canal AN3. Si no ha transcurrido un segundo completo desde que la cámara se encuentra en la posición de abajo ó desde la última toma de muestra del gas, este bit permanece en “0”.

#### **3.3.2.2.2.4 Bit 3 (-)**

Este bit no se utiliza en el proceso.

#### **3.3.2.2.2.5 Bit 4 (BANCO)**

Ya que se toman 120 muestras del gas, las cuales no se pueden almacenar dentro de un mismo banco de memoria RAM del PIC, es necesario separar los datos en 2 grupos de 60 bytes cada uno. Los primeros 60 bytes se almacenan dentro del banco 2 comenzando en la posición 0x126 y terminando en la posición 0x161. Los siguientes 60 bytes son almacenados dentro del banco 3 de la RAM del PIC comenzando en la posición de memoria 0x1A6 y terminando en la posición 0x1E1. Para que el microcontrolador sepa en cual de los 2 bancos se va a almacenar el dato se utiliza el bit 4, cuando está en “0” el banco donde se escribe es el 2 y cuando está en “1” se escribe en el banco 3.

#### **3.3.2.2.2.6 Bit 5 (-)**

Este bit no se utiliza en el proceso.

#### **3.3.2.2.2.7 Bit 6 (SUBIR)**

Cuando este bit se pone en “1”, el PIC entiende que se ha tomado todas las 120 muestras de CO<sub>2</sub> y procede a llevar la cámara de acumulación a la posición inicial.

#### **3.3.2.2.2.8 Bit 7 (HECHO)**

Cuando se pone en “1” le indica al PIC que el proceso ha finalizado y únicamente se queda esperando que se limpie el sensor de CO<sub>2</sub> dejando trabajar la bomba durante 10 segundos más.

### 3.4 MODULOS DE RF (Wi-Fi)

El diseño implementado para la red de monitoreo de la estación multiparametrica es del tipo ad-hoc (punto-punto) descrita en el capítulo 2, debido a que es solamente una estación la que se estará monitoreando.

#### 3.4.1 Elementos de la red WLAN

La red de monitoreo esta conformada por 4 elementos los cuales tienen su respectiva dirección IP que lo identifique dentro de la red WLAN, los cuatro elementos son:

1. Computadora receptora (Estación procesadora central).
2. Access point receptor (AP 1).
3. Access point transmisor (AP 2).
4. Estación multiparametrica.

Los elementos 1 y 2 se encuentran del lado donde se reciben los datos, y los elementos 3 y 4 del lado de la estación multiparametrica en el volcán.

##### 3.4.1.1 Estación procesadora central.

La estación procesadora central esta configurada como se muestra en la figura 3.29. Ambos elementos son conectados por un medio físico ya que estos están en el mismo lugar, el medio es un cable UTP. La IP de cada elemento debe estar en el rango de elementos que proporciona la mascara de red 255.255.0.0.

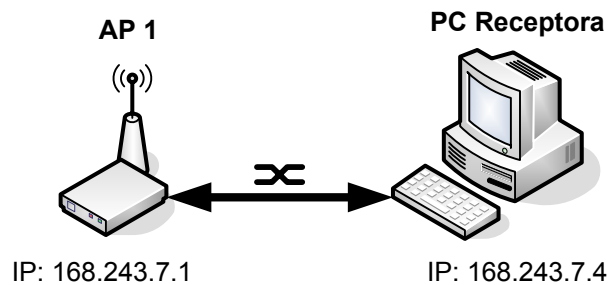


Figura 3.29. Estación procesadora central.

En la computadora debe de estar instalado el programa LabView, con el cual se le dará representación grafica a los datos que se reciban.

##### 3.4.1.2 Estación multiparametrica.

La estación multiparametrica esta configurada como se muestra en la figura 3.30.

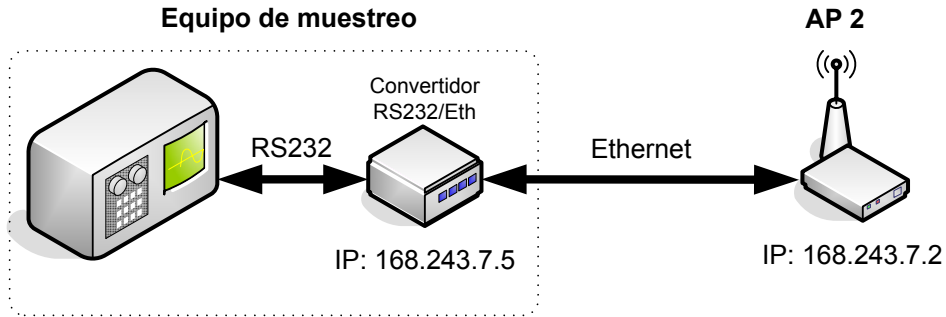


Figura 3.30. Estación multiparamétrica

El equipo de muestreo esta formado por el circuito encargado de medir las variables físicas y transformarlas a señales eléctricas que son acopladas y digitalizadas para ser enviadas en una trama por el protocolo RS232 hacia un convertidor RS232/Eth.

Este convertidor de RS232/Eth es clave para la comunicación ya cuenta con una dirección IP para formar parte de la red WLAN, sin este los datos medidos no podrían viajar a través de la red. Este convertidor esta configurado de tal forma que los datos en forma RS232 que recibe sean enviados a un host, teniendo el cuidado que este host debe coincidir con el nombre de la computadora receptora y su IP. De esta forma el paquete enviado a través del puerto Ethernet buscara la dirección IP de la computadora de procesamiento.

### 3.4.1.3 Enlace inalámbrico para la WLAN.

El enlace inalámbrico se realiza usando el protocolo Wi-Fi, por medio de los 2 AP. Se utiliza a la salida de cada punto de acceso un amplificador de 1W, y a la salida de este amplificador se conecta una antena parabólica con ganancia de 24 dBi, de esta forma se garantiza un enlace desde la estación remota ubicada en el volcán y la estación receptora, es importante que haya línea vista entre los dos puntos del enlace.

La figura 3.31 muestra la configuración del enlace inalámbrico de la estación multiparamétrica.

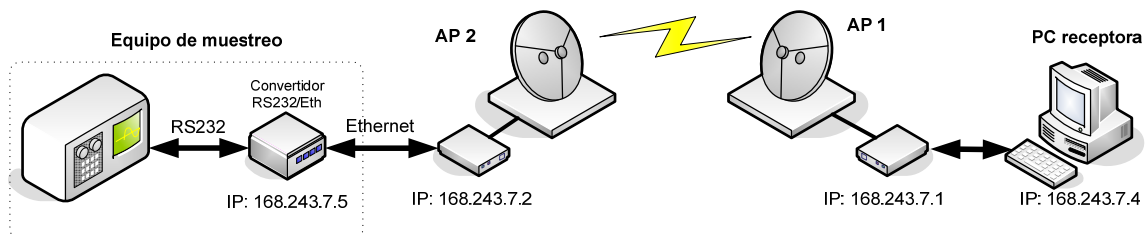


Figura 3.31. Enlace WLAN

### 3.5 ESTACION PROCESADORA CENTRAL.

La parte principal de esta etapa la compone el programa creado en LabView 7.1, que se esta ejecutando en la PC. Este funciona como un instrumento virtual para visualizar de forma inmediata los resultados de las muestras que han sido tomadas por el sistema multiparametrico en el volcán. Las partes que conforman este instrumento y su presentación se explican continuación.

#### 3.5.1 Panel frontal.

El panel frontal corresponde a la interfaz gráfica en la cual se presentan los datos medidos. En esta parte se hace uso de campos numéricos, botones, gráficas entre otros; para poder presentar en la pantalla de la PC los datos requeridos por el usuario.

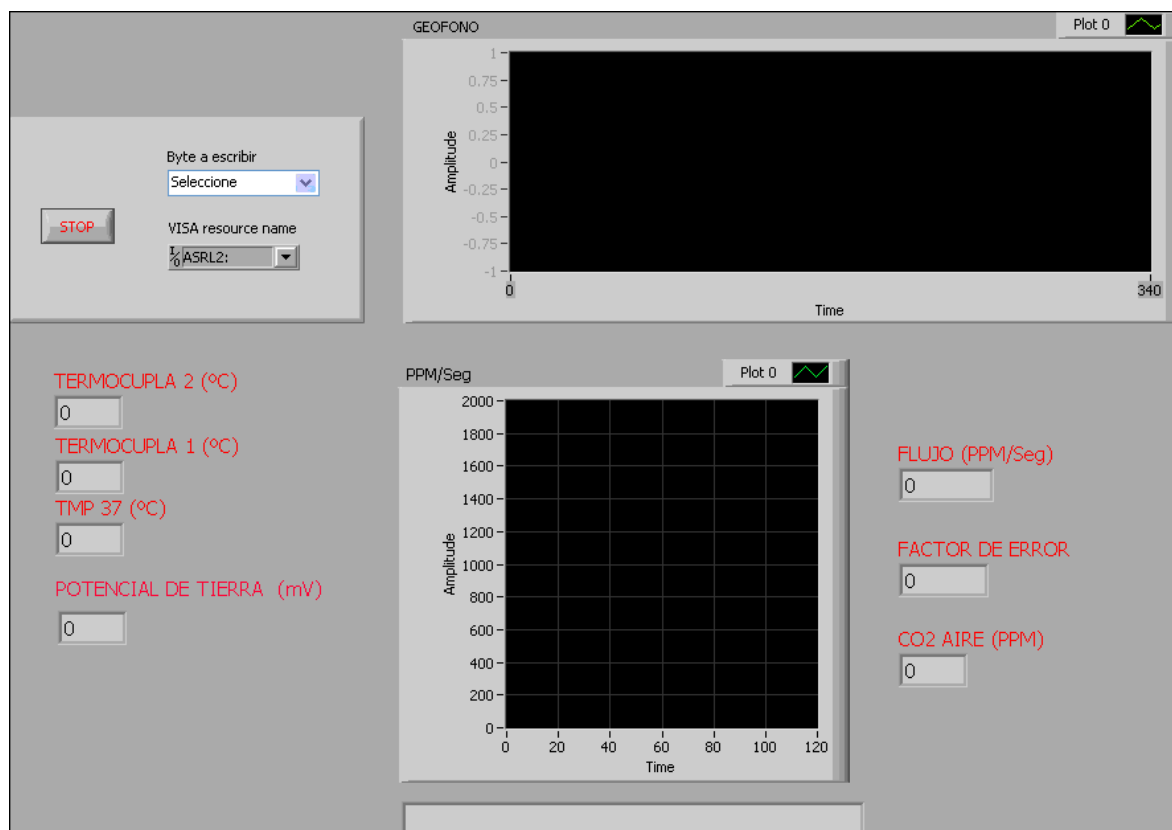


Figura 3.32. Panel de Control diseñado para el monitoreo vulcanológico

El panel de control mostrado en la figura 3.32 consta de 2 gráficas en las cuales se presenta los datos medidos del Geófono y la razón de flujo de CO<sub>2</sub> en ppm/seg. Con respecto a los otros datos, se han creado campos numéricos en los cuales se presentan dichos datos.

### 3.5.2 Diagrama de bloque general del programa de monitoreo

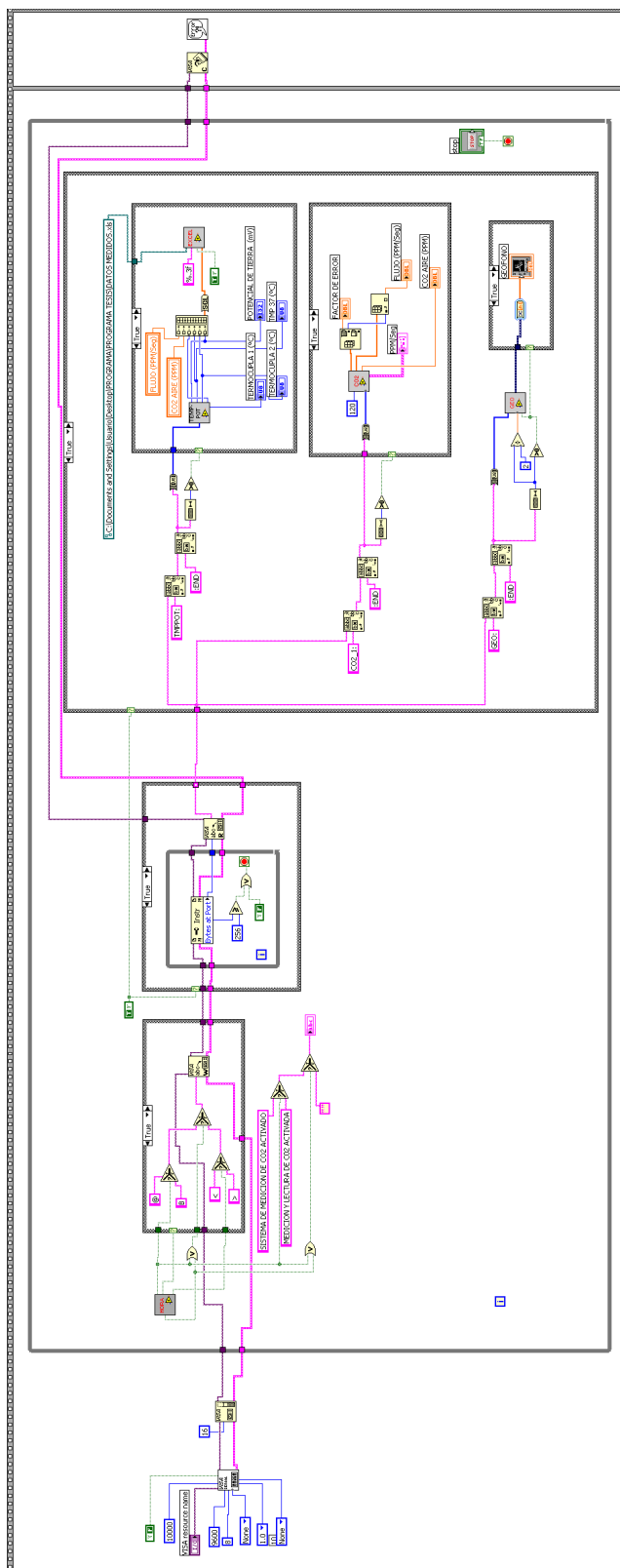


Figura 3.33 Diagrama de bloques del programa en LabView



El diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.33 corresponde a la programación a través del enlace lógico de funciones, SubVI's, y variables locales usadas para lograr la función requerida por el sistema. El diagrama de bloques del sistema de monitoreo vulcanológico puede dividirse en 4 etapas principales:

- a) Configuración del puerto serial
- b) Escritura hacia el circuito
- c) Lectura de datos medidos por el circuito
- d) Decodificación y presentación de los datos medidos

### 3.5.2.1 Configuración del puerto serial.

La primera etapa del programa consiste en la configuración del puerto serial a ocupar y el establecimiento del buffer de entrada y salida de datos. Lo anterior se muestra en la figura 3.34.

La configuración utilizada para el puerto serial es la siguiente:

Bits por segundo = 9600  
Bits por dato = 8  
Paridad = Ninguno  
Control de Flujo = Ninguno

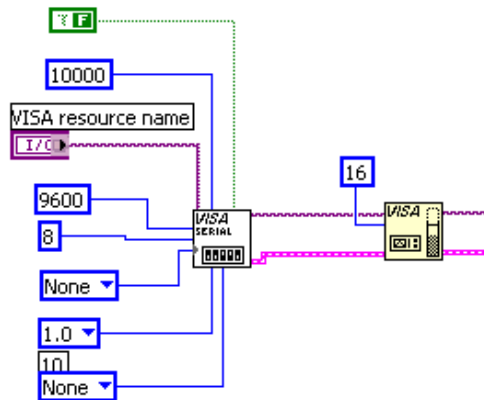


Figura 3.34. Configuración del puerto serial.

### 3.5.2.2 Escritura de datos hacia el circuito.

Debido a que la estación multiparamétrica es controlada por medio de la hora del sistema de la computadora, se hace necesario el escribir algunos caracteres hacia el circuito dependiendo de la función que se desee realizar. Para ello, previamente en el programa del PIC se han definido ciertos caracteres que permitirán activar las funciones requeridas tales como:

- Activación del motor de la cámara de CO<sub>2</sub> y la bomba(a través del carácter @).
- Medición y envío hacia la PC de los datos de CO<sub>2</sub> (a través del carácter B).
- Medición de temperaturas y potencial de tierra (a través del carácter <).
- Envío hacia la PC de los datos medidos de temperatura y potencial de tierra (a través del carácter >).

Por lo anterior, la segunda etapa del programa, mostrada en la figura 3.35, consiste en la escritura sincronizada de los caracteres antes mencionados. Esta escritura se controla por una SubVI denominada “HORA” la cual establecerá el tipo de carácter a escribir dependiendo de la hora.

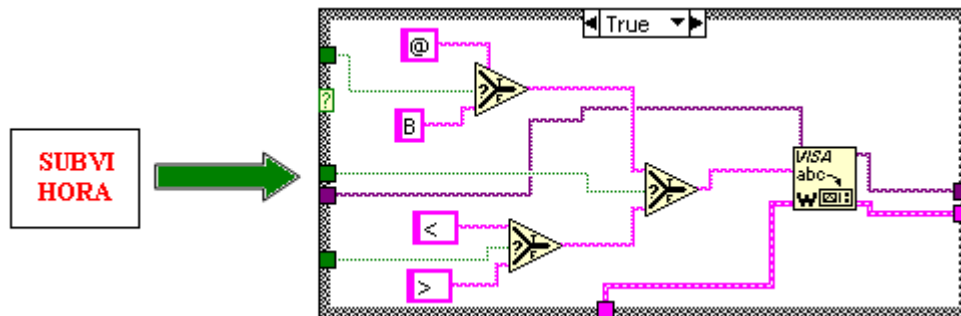


Figura 3.35. Etapa de escritura sincronizada por la hora del sistema

Cabe mencionar que mientras el proceso de escritura sincronizada se mantenga inactivo (la estructura Case en estado False), el usuario puede escribir los mismos caracteres en forma manual tal como se muestra en la figura 3.36.

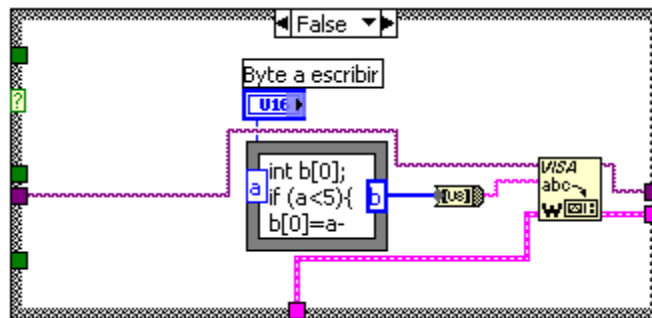


Figura 3.36. Etapa de escritura manual

### 3.5.2.3 Lectura de datos medidos por el circuito.

Usando la función “Visa Read”, se leen todas las tramas enviadas por el microprocesador limitando esta lectura al número de bytes que se desean capturar. Esta etapa se muestra en la figura 3.37.

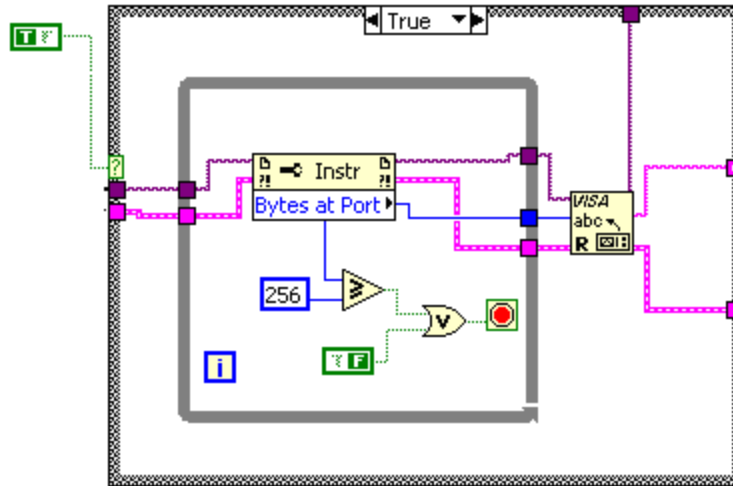


Figura 3.37. Etapa de lectura de datos

De las 3 tramas enviadas, la de mayor longitud es la de CO2 con 131 bytes, por lo que el número de bytes a leer debe ser mayor a éste para evitar lecturas incompletas.

#### 3.5.2.4 Decodificación y presentación de los datos medidos.

Esta etapa puede dividirse en 3 sub-etapas en las se realiza el proceso total de decodificación, cálculo y presentación en pantalla de los 6 parámetros vulcanológicos de interés.

- **Decodificación y Presentación de los datos de Potencial de Tierra y Temperatura de las Termocuplas y TMP37**

La trama en las que se envían estos datos esta delimitada por las palabras **TMPPOT:** y **:END** por lo que el primer paso es determinar de todas las tramas enviadas, aquella que lleve la palabra **POT:**. Habiendo realizado este paso, se procede a quitar la palabra **:END** para obtener la trama final que contiene solamente los 4 bytes correspondientes a la lectura de las 2 termocuplas, el TMP37 y el potencial de tierra. A continuación los datos entran a una estructura "Case" la cual se activa solamente cuando la longitud de la trama resultante sea mayor que cero es decir, cuando la trama leída inicialmente corresponda realmente a la lectura de los datos de los sensores de temperatura y potencial de tierra.

Dentro del "Case", se decodifican los datos utilizando una SubVI llamada **TEMP-POT**, para finalmente ser presentados en pantalla y ser guardados a la vez en un archivo Excel destinado para ello. Lo anterior se muestra en la figura 3.38.

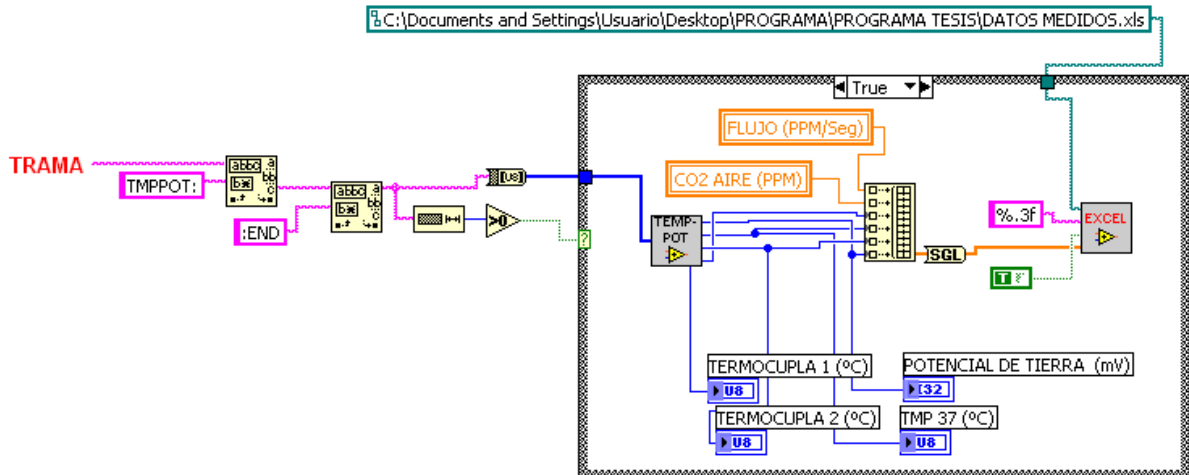


Figura 3.38. Etapa de decodificación y presentación de los datos medidos de temperatura y potencial de tierra.

### Decodificación y Presentación de los datos de CO<sub>2</sub>

La trama del CO<sub>2</sub> se delimita por las palabras **CO2\_1:** y **:END**. Al igual que en la sub etapa anterior, la trama se captura determinando aquella que comience con la palabra **CO2\_1:** para luego quitarle la palabra **:END**. Teniendo la trama resultante solamente con los datos leídos del sensor de CO<sub>2</sub>, ésta se envía a una estructura “Case” para ser decodificada a través de una SubVI llamada **CO<sub>2</sub>** (figura 3.39). Luego, se muestran en pantalla los datos requeridos de Flujo de CO<sub>2</sub> (ppm/seg), CO<sub>2</sub> del Aire, el factor de error y la respectiva gráfica de CO<sub>2</sub>. Los dos primeros datos se guardan temporalmente en dos variables locales para luego ser enviados al archivo Excel de igual forma que con los datos de temperaturas y potencial de tierra.

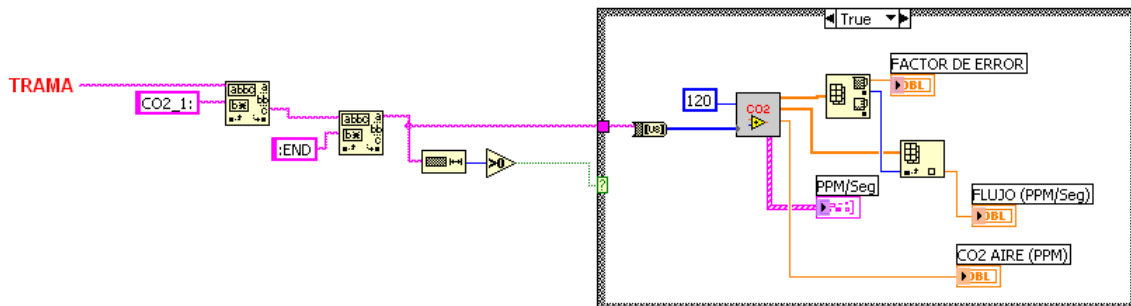


Figura 3.39. Etapa de decodificación y presentación de los datos medidos de CO<sub>2</sub>

### Decodificación y Presentación de los datos del Geófono

Esta trama se delimita por las palabras **GEO:** y **:END**. De igual forma que en los casos anteriores, se eliminan ambas palabras de la trama para obtener la trama final que solo contenga los datos leídos del Geófono. Luego, esta trama se decodifica

usando una SubVI denominada GEO para ser presentada finalmente en pantalla a través de un gráfico. Esta etapa se muestra en la figura 3.40.

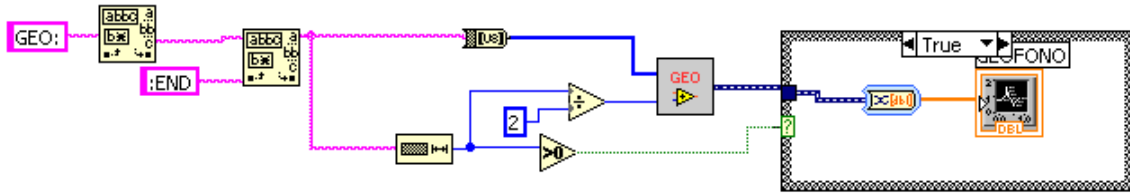


Figura 3.40. Etapa de decodificación y presentación de los datos medidos del Geófono

### 3.5.3 Uso de SUBVI'S

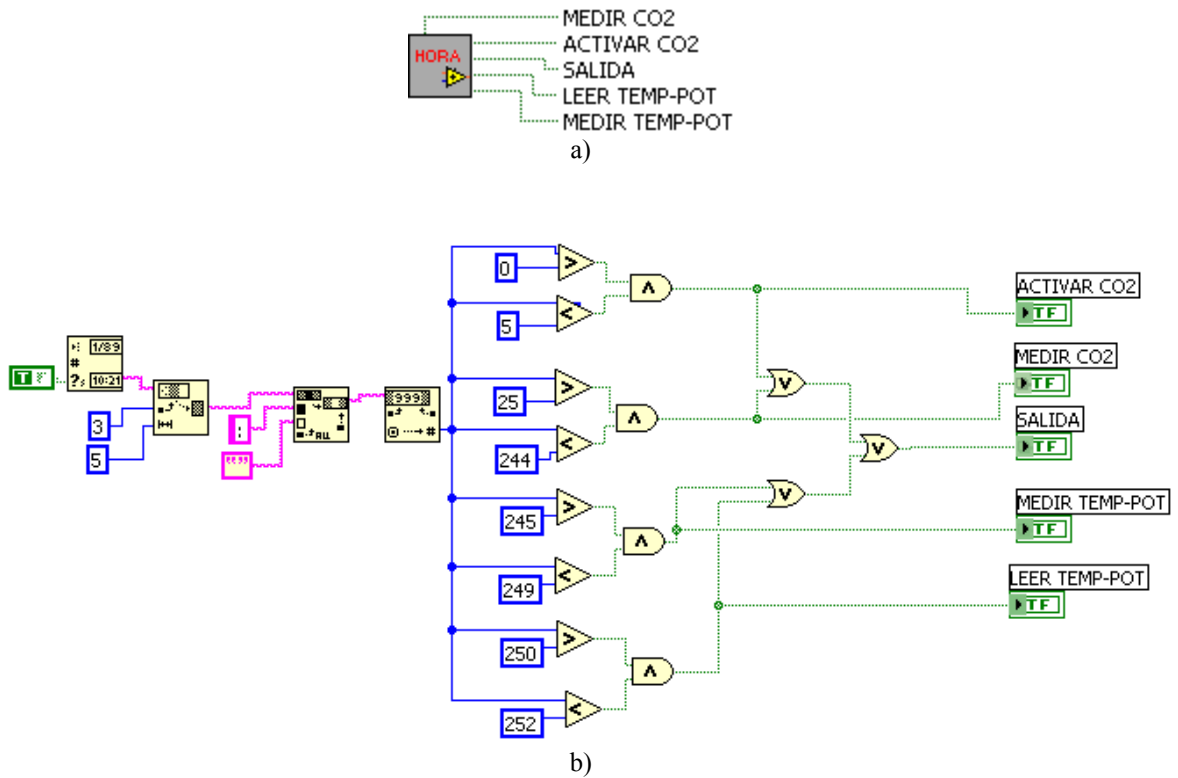
El programa ha sido diseñado haciendo uso de 6 SubVI's con la finalidad de minimizar el tamaño del programa principal y generar de esta forma un programa con una mejor presentación y fácil de entendimiento para los usuarios. Cabe mencionar que la mayoría de estas SubVI's son usadas para la decodificación de los datos medidos. Los nombres de las SubVI's utilizadas son los siguientes:

- a) HORA
- b) TEMP-POT
- c) CO2
- d) GEO
- e) SLOPE
- f) EXCEL

#### 3.5.3.1 SUBVI HORA

En esta SubVI (Figura 3.41) se sincroniza la medición y lectura de los parámetros vulcanológicos (excepto el Geófono el cual esta siendo medido constantemente). La primera etapa consiste en obtener la hora del sistema de la computadora y substraer solamente el dato de minutos y segundos. Este dato luego es comparado con los valores previamente establecidos para ejecutar alguna activación o medición de la siguiente manera:

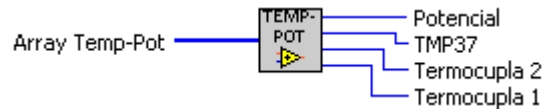
- Cuando la hora se encuentre entre los valores 00:01 y 00:04, se activa el mecanismo para medir CO<sub>2</sub>.
- Cuando la hora encuentre entre los valores 00:26 y 02:43, se miden los valores de CO<sub>2</sub>.
- Entre las 02:46 y 02:48, se miden las temperaturas y el potencial de tierra.
- La lectura de las temperaturas y el potencial de tierra se realiza a las 02:51.



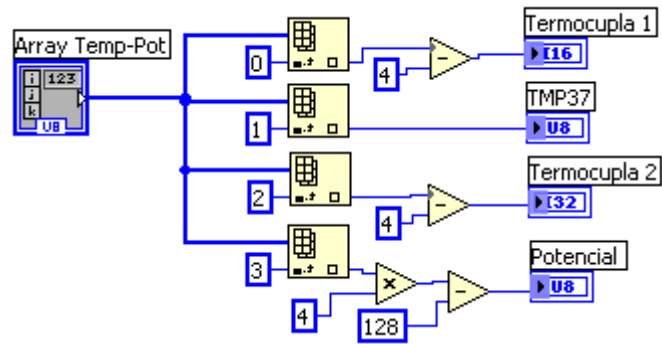
Figuras 3.41 a y b. *SubVI HORA*

### 3.5.3.2 SUBVI TEMP-POT

Los valores de las temperaturas y el potencial de tierra son enviados a través de una misma trama. Esta *SubVI* se muestra en la figura 3.42 y permite extraer cada uno de los 4 valores medidos para luego ser condicionados a valores reales en base a las pruebas realizadas anteriormente de linealidad y exactitud. En el caso de las termocuplas, se realiza una resta de 4 unidades antes de ser desplegados en pantalla (para contrarrestar la desviación lineal presentada en el circuito acondicionador). El valor de potencial de tierra será multiplicado por 4 y luego se le restará 128 (para contrarrestar el offset definido en el circuito externo).



a)



b)

Figura 3.42 a y b. *SubVI TEMP-POT*

### 3.5.3.3 SUBVI CO<sub>2</sub>

En esta SubVI, mostrada en la figura 3.43, se decodifica los valores de la trama de CO<sub>2</sub>. La primera etapa consiste en convertir el código binario en código decimal en base al rango de valores que se puede medir (0 a 2000 ppm/seg) para luego colocarlos en un arreglo de datos. Este arreglo se envía a otra SubVI denominada **Slope** en donde se calcula el factor de error y el flujo de CO<sub>2</sub>. Cabe mencionar que este último cálculo se realizará en grupos de 60 datos de tal forma que al final se tendrán 2 arreglos de 60 valores por cada arreglo, conteniendo el factor de error y el flujo de CO<sub>2</sub>. A la vez, se calcula el valor de CO<sub>2</sub> del aire tomando como parámetro inicial las primeras 5 lecturas.

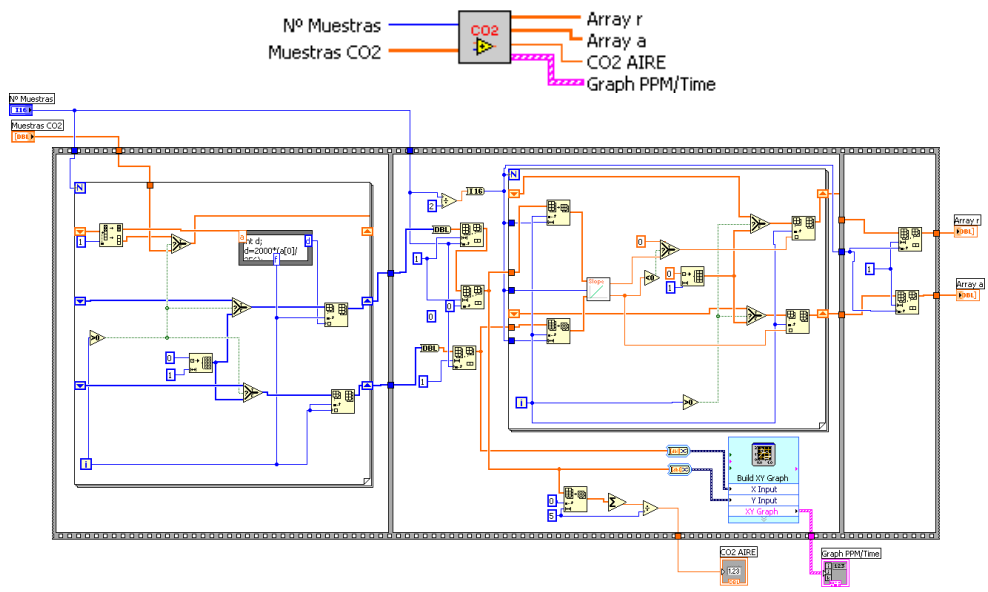


Figura 3.43 *SubVI CO2*

### 3.5.3.4 SUBVI GEO

Esta SubVI decodifica las tramas que contienen los valores medidos del Geófono. Esta decodificación consiste en convertir el código binario en decimal y luego ingresar estos valores a un arreglo de 32 datos. Este arreglo se envía posteriormente a un filtro pasa bajo con una frecuencia de corte de 10 Hz y una frecuencia de muestreo de 128 Hz. Esta SubVI se muestra en la figura 3.44.

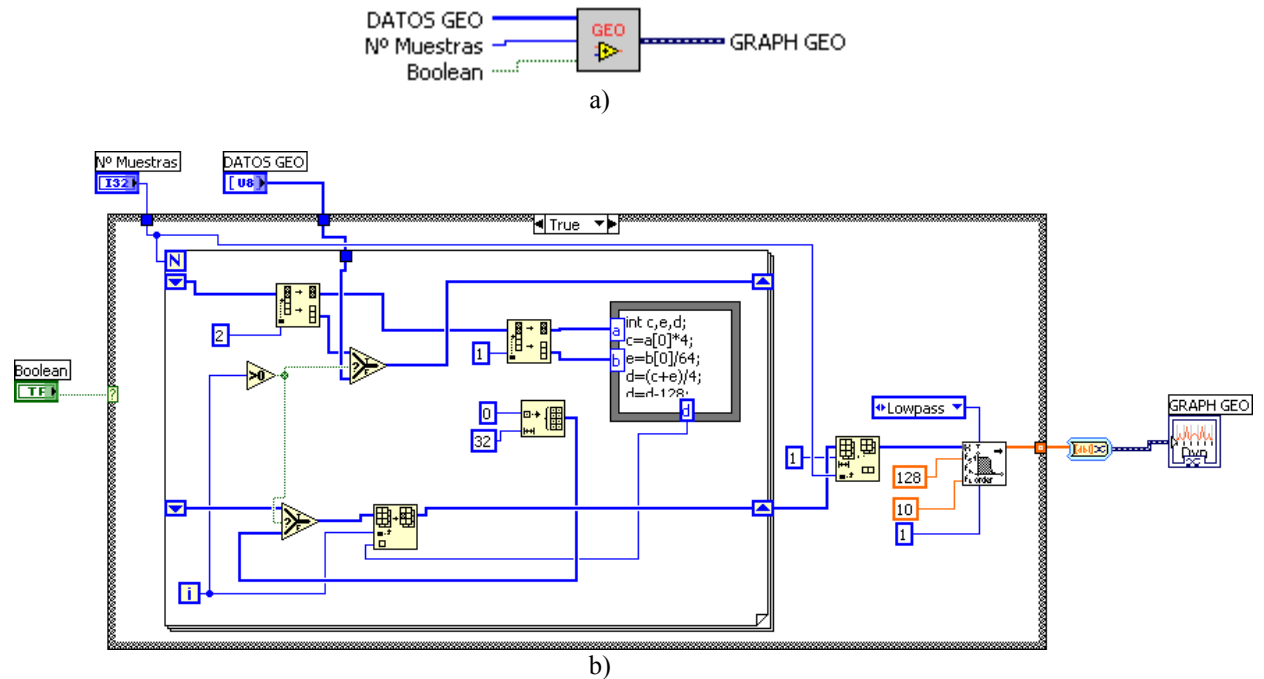


Figura 3.44 a y b. *SubVI GEO*



### 3.5.3.5 SUBVI SLOPE

Aquí se calcula el flujo de CO<sub>2</sub> y el factor de error. El SUBVI se muestra en la figura 3.45.

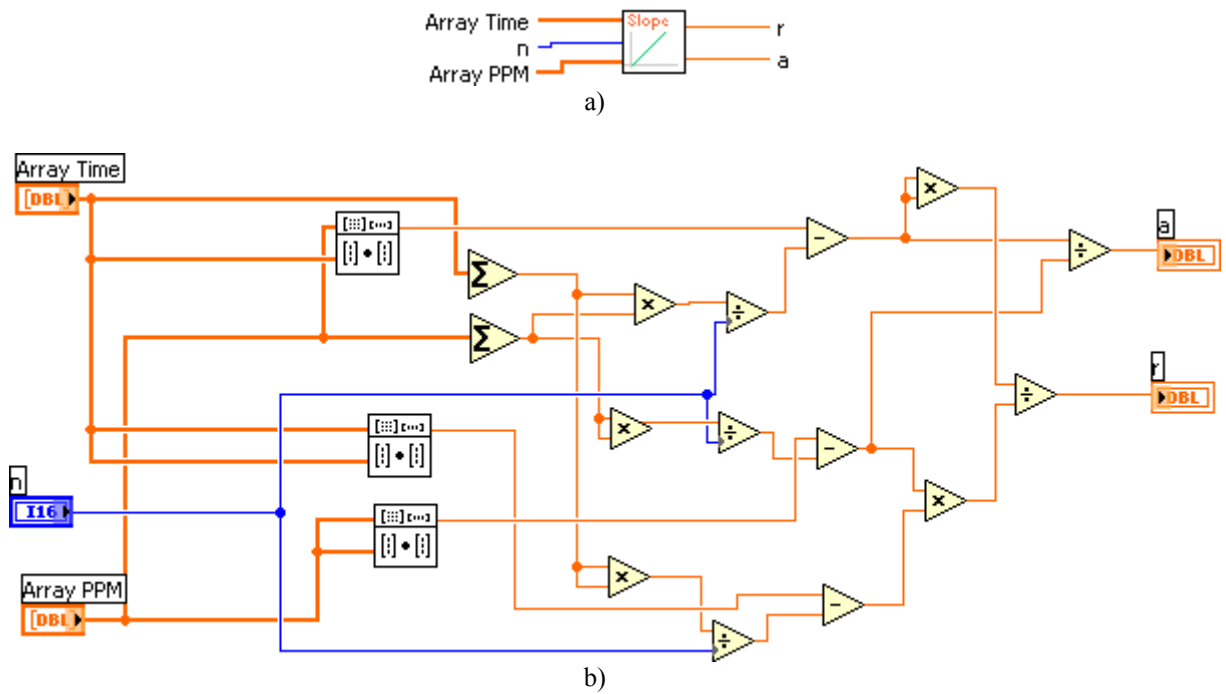


Figura 3.45 a y b. *SubVI Slope*

### 3.5.3.6 SUBVI EXCEL

Esta SubVI (figura 3.46) ejecuta la escritura de las temperaturas, potencial de tierra, CO<sub>2</sub> (flujo y CO<sub>2</sub> aire) en un archivo Excel previamente creado denominado DATOS MEDIDOS.xls.

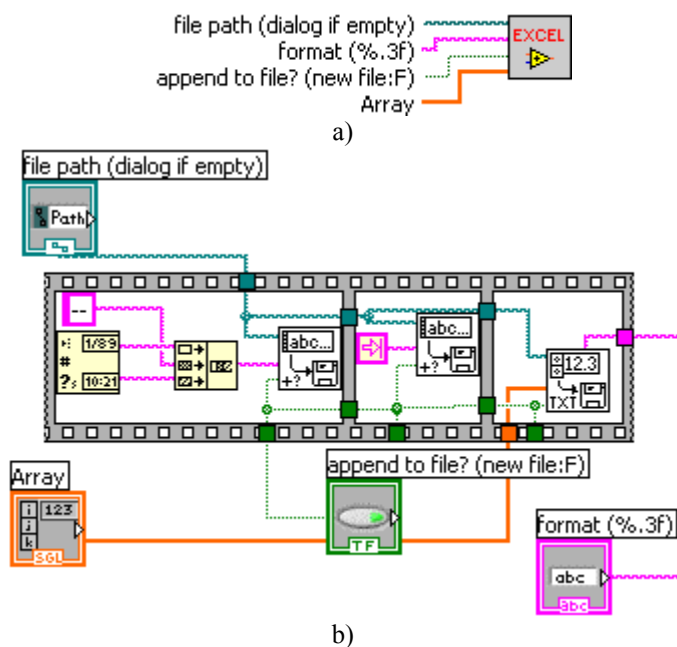


Figura 3.46 a y b. *SubVI EXCEL*

### 3.5 CONCLUSIONES.

- El circuito de acondicionamiento y adquisición de datos esta construido con elementos de fácil adquisición, por lo que éste circuito se convierte en una alternativa viable y de bajo costo para el GIV-UES.
- Una gran ventaja del sistema es la forma fácil de manipular la captura de datos vulcanológicos a través del programa en LabView, sin necesidad de rediseñar ningún circuito.
- Debido a la modularidad del diseño de la estación multiparametrica, presenta la facilidad de cambio en alguna de sus piezas en caso de fallas.
- El sistema diseñado tiene la capacidad de realizar las mismas funciones de las estaciones que actualmente operan, pero con la ventaja de automatizar la descarga de los datos hasta el lugar de análisis en vez de esperar que sean descargados de forma manual.
- En los canales analógicos donde se encuentran conectados los sensores de CO<sub>2</sub> y de temperatura TMP37 pueden ser utilizados por otros sensores cuya salida analógica varíe en un rango de 0 a +5 V DC, sin la necesidad de modificar el hardware y únicamente adecuando el software.

## **CAPITULO IV**

### **PRUEBAS DE CAMPO. MEDICIONES EN EL VOLCÁN DE SANTA ANA**

#### **INTRODUCCION**

Un prototipo es un diseño de prueba de un modelo que se va a producir, este sirve para observar el funcionamiento que el modelo tendrá en operaciones normales, de este se obtienen las mejoras en el funcionamiento y los resultados bajo condiciones reales en las que funcionará el modelo.

En el presente capítulo se presentan los resultados de las pruebas de campo obtenidos con la estación de monitoreo instalada en el volcán de Santa Ana, con el objetivo de observar su funcionamiento bajo condiciones reales y comparar tales resultados con una estación comercial.

También se demuestra teóricamente y mediante un software de calculo de radioenlace, que sí es posible la comunicación entre estos dos puntos.

#### 4.1 DESCRIPCION FUNCIONAL DEL EQUIPO.

En esta sección se presenta la descripción del funcionamiento de cada parte de la estación, incluyendo las pruebas de laboratorio y su configuración básica. También se analiza el consumo de energía que ésta demanda.

##### 4.1.1 Análisis de carga eléctrica.

Con el fin de determinar el tiempo máximo de autonomía del sistema, se realizó el análisis de carga eléctrica para obtener el consumo total de potencia de la estación multiparamétrica cuando ésta opera a plena carga.

Para poder realizar esta prueba, fue necesario determinar la potencia consumida por el sistema cuando se encuentran involucrados todos los elementos de la estación multiparamétrica. Los valores nominales de las corrientes se midieron utilizando una tenaza amperimétrica marca FLUKE y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.1.

<i>Equipo</i>	<i>Voltaje (V)</i>	<i>Corriente (A)</i>	<i>Potencia (W)</i>
Motor	5	0.8	4.0
Bomba	12	0.3	3.6
Convertidor RS232/Eth	12	0.2	2.4
Analizador de CO <sub>2</sub>	12	1	12
AP	12	0.25	3
Amplificador WI-FI	12	0.25	3
Circuito	5	0.25	1.25
<b>Consumo total</b>		<b>3.05 A</b>	<b>29.25 W</b>

Tabla 4.1 *Carga demandada por la estación multiparamétrica.*

La alimentación del sistema la proporciona un módulo de potencia conformado por 3 baterías modelo GP 1270 F2 con características de 12 V / 7 AH las cuales, se conectan en paralelo para incrementar la capacidad de corriente que se proporciona a la carga. A este arreglo, se le midió la corriente demandada bajo condiciones de plena carga, funcionando con todo el equipo listado en la tabla 4.1, obteniéndose el valor de 3.05 A y 29.25 W. Estos valores solamente se mantienen en el instante en que la cámara de acumulación baja ó sube, pues es el único momento en el cual trabaja el motor. El resto del tiempo que comprende la toma de muestras de CO<sub>2</sub>, solamente se mantiene apagado el motor mientras los demás dispositivos permanecen activos y el consumo total es de 2.25 A / 25.25 W. Cuando el sistema está en modo de espera, el consumo total se reduce a 0.95 A / 9.65 W. Esta demanda de carga es suficientemente pequeña como para no dejar que el sistema consuma la carga total del banco de baterías en un corto plazo. Además para incrementar la capacidad de suministro energético en este tipo de sistemas, se incluye un panel de celdas

fotovoltaicas que orientados correctamente, permiten recargar el módulo de energía durante un período de 4 horas en promedio por día, lo suficiente para impedir que el módulo se descargue durante el resto del día.

Bajo estas condiciones de carga, el módulo de energía permaneció suministrando la potencia necesaria, durante aproximadamente 48 horas continuas mientras la estación operaba de forma normal tomando muestras cada hora y enviando las lecturas del geófono a una razón de 4 tramas por segundo. Cabe aclarar que el suministro energético no llegó a su límite, pues luego de sobrepasar las 48 horas, la prueba fue suspendida pues sobrepasó las expectativas. También se probó durante 6 horas en condiciones reales de operación en el volcán con la atenuante de las condiciones ambientales, pues la mayor parte del tiempo que duró la prueba, el ambiente permaneció con bastante humedad.

De todas estas pruebas realizadas, se llegó a demostrar que la alimentación provista para el sistema es suficiente para mantener su funcionamiento por un período prolongado de tiempo, recordando que es necesario un sistema alternativo de recarga para las baterías, el cual puede ser a través de celdas solares.

#### **4.1.2 Pruebas de laboratorio.**

El prototipo diseñado fue sometido a diversas pruebas de estabilidad, las cuales sirvieron para detectar errores tanto en el software como en el diseño del hardware. Ambos lograron optimizarse por medio de estas pruebas hasta llegar al diseño final. La estabilidad final de la estación multiparamétrica se realizó de forma simultánea con la prueba del módulo de energía, en la cual se comprobó el buen desempeño tanto del funcionamiento como del consumo energético. Cabe aclarar que no se realizó en la fumarola del volcán, sino en condiciones de vigilancia continua en un lugar de prueba adecuado.

En la prueba de estabilidad, al igual que en la del módulo de suministro de energía se dejó operando el prototipo de la estación multiparamétrica durante un período de 48 horas continuas, verificando que se tomaran las lecturas correctas de los sensores y además realizando el proceso correcto de muestreo de CO<sub>2</sub>. También se monitorearon las tramas de datos que este mandaba vía RS232 a la computadora procesadora para garantizar que éstas llevaran las lecturas correctas desde los sensores hasta la PC y que los datos desplegados en la pantalla fueran aceptables.

El equipo fue instalado en el lugar de prueba, se conectó cada sensor a su respectivo borne (como se muestra en la figuras 4.1, 4.2 y 4.3) y también se montaron los dispositivos para establecer el enlace (el equipo que conformó el enlace fueron los Acces Point ó AP's, el convertidor RS232/Eth y las antenas omnidireccional y parabólicas) a una distancia de 25 m aproximadamente. La lectura de cada sensor se comparó con un patrón de medición.



Figura 4.1 Esquema de conexión de mangueras, motor, bomba y switch

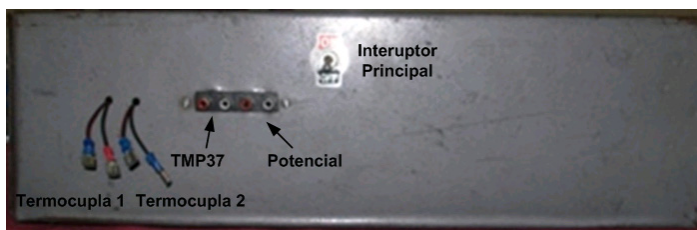


Figura 4.2 Esquema de conexión de sensores de temperatura y potencial



Figura 4.3 Conectores para la alimentación de módulos RF

Para probar la veracidad de los datos arrojados por los sensores de temperatura se utilizaron patrones a base de agua fría y caliente. En ambos casos las mediciones se compararon con las lecturas realizadas por un termómetro digital que censó de forma simultánea los patrones y las lecturas fueron buenas.

La prueba de funcionamiento del geófono consistió en colocar sobre una superficie el sensor y luego hacerla vibrar para registrar cambios en la salida del geófono. En una de las gráficas del software de aplicación, se observaba la señal generada por éstas vibraciones.

En el caso de la prueba del CO<sub>2</sub>, se realizó previamente una serie de mediciones bajo condiciones ambientales, las cuales se usaron como referencia para las mediciones en condiciones reales. Luego, se comprobó gráficamente la variación en la concentración de CO<sub>2</sub> colocando una fuente de humo (papel quemado) bajo la cámara de acumulación y activando el sistema. Durante este proceso se registró un incremento brusco en la medición producto de la alta concentración de CO<sub>2</sub> en el humo, lo cual indicaba el buen funcionamiento del sensor acoplado a la estación.

Con respecto a la medición de potencial espontáneo, se hizo enterrando dos de los tres electrodos de medición separados 6 m. El electrodo de referencia se ubicó justo en el punto

medio de ambos para mantener una simetría. La lectura registrada varió entre 50 mV y 100 mV bajo condiciones de tierra seca y 150 mV y 200 mV en tierra húmeda.

#### **4.1.3 Configuración básica.**

Antes de la instalación de los dispositivos en el punto de interés, es necesario pre-configurar algunos de ellos. Los que necesitan ser configurados antes de su instalación son, el analizador de CO<sub>2</sub> LI-840, el Acces Point marca Linksys y el convertidor RS232/Eth marca Perle. Los demás dispositivos (el amplificador WI-FI marca HyperLink modelo HA2401RTG-1000 y el circuito de adquisición y procesamiento de datos) no necesitan configuración previa pues únicamente se acoplan a los demás dispositivos, se energizan y comienzan a trabajar. Mientras tanto en la estación procesadora central es necesario configurar el puerto COM virtual, el Acces Point marca Orinoco modelo AP2000EA y el nombre de la computadora que operará como HOST para el dispositivo convertidor RS232/Eth, así como también su dirección IP. A continuación se describe cada una de estas configuraciones:

##### **4.1.3.1 Configuración en la estación procesadora central.**

- Access Point (AP).

Es necesario configurar el AP marca Orinoco asignándole una dirección IP dentro de la máscara que lo identificará como un elemento de la red. (Ver apéndice G)

- Estación procesadora central.

Es necesario configurar un puerto COM virtual que servirá como punto de enlace entre el programa elaborado en Lab-View y el circuito de adquisición y procesamiento de datos a través del enlace Wi-Fi. La computadora que ejecuta el software de aplicación debe tener el mismo nombre que ha sido previamente definido como host en la configuración interna del dispositivo convertidor de serial a Ethernet, además esta PC debe tener una dirección IP que la identifique como elemento de la red.

##### **4.1.3.2 Configuración en la estación multiparamétrica.**

- Analizador de CO<sub>2</sub>.

En este dispositivo la configuración de mayor importancia es la resolución de los ppm de la señal de salida mediante el rango de concentración. La configuración detallada de este equipo se muestra en el apéndice C.



- Access Point (AP).

Es necesario configurar el AP marca Linksys asignándole una dirección IP dentro de la máscara que lo identificará como un elemento de la red. La configuración detallada se muestra en el apéndice G.

- Convertidor RS232/Eth.

Este equipo también debe contener una dirección IP que se encuentre dentro de la máscara de red. Además debe tener la dirección IP del host que maneja el puerto COM virtual. La configuración detallada es explicada en el apéndice F.

#### **4.1.4 Análisis de radioenlace.**

El cálculo del balance de potencias es el procedimiento que se utiliza normalmente para estimar de una manera rápida si un radioenlace funcionará correctamente. No obstante, debe tenerse en cuenta que se trata de un cálculo teórico, y que por lo tanto está sujeto a variaciones debidas a múltiples factores: direccionamiento de las antenas, reflexiones, interferencias no deseadas, etc.

En la región del espectro radioeléctrico que corresponde a las microondas y ondas milimétricas, donde la frecuencia varía desde 1 GHz hasta 300 GHz, la ionosfera puede considerarse transparente a la propagación de las ondas electromagnéticas. Esto se debe a que el efecto del campo magnético terrestre sobre los electrones es despreciable para frecuencias por encima de 10 MHz, y la frecuencia del plasma que está directamente relacionada con el fenómeno de refracción/reflexión ionosférica también es mucho menor. La propagación de ondas en este rango de frecuencias se produce generalmente con visión directa entre las antenas. Los principales factores que afectan a la propagación de señales de radio en este rango de frecuencias se resumen a continuación.

##### **4.1.4.1 Principales magnitudes que intervienen en el radioenlace**

A continuación se describen las principales magnitudes que se utilizan para calcular el balance de potencias de un radioenlace. El resultado final de los cálculos es el margen resultante, cuyo valor nos proporciona información acerca del correcto funcionamiento del sistema desde un punto de vista teórico. En la práctica, los radioenlaces se suelen diseñar para obtener un margen de pérdidas de unos 5-6 dB, aunque este valor es muy dependiente de la distancia, frecuencia y tipo de sistema.

#### 4.1.4.1.1 Potencia transmitida.

La potencia del transmisor se expresa habitualmente en unidades lineales (mW, W) o logarítmicas (dBm, dBW). Para la conversión entre magnitudes lineales y logarítmicas se utiliza la siguiente fórmula:

$$P(\text{dBm}) = 10 \log_{10} \frac{P(W)}{0.001}$$

#### 4.1.4.1.2 Ganancias de las antenas transmisora y receptora.

La ganancia de la antena se proporciona habitualmente en dB isotrópicos (dBi), es decir, la ganancia de potencia con respecto a un modelo teórico de antena isotrópica que radia la misma energía en todas las direcciones del espacio. En algunos casos, la ganancia se expresa en dBd con respecto a una antena de tipo dipolo. En este caso, se tiene la siguiente fórmula de conversión:

$$G(\text{dBi}) = G(\text{dBd}) + 2.14$$

#### 4.1.4.1.3 Pérdidas básicas de propagación en espacio libre.

Se trata de las pérdidas de propagación que sufre la señal radioeléctrica en condiciones de espacio libre: sin ningún obstáculo en el camino, es decir, visión directa entre las antenas. En esta magnitud no suelen incluirse otras pérdidas adicionales debidas a lluvia, absorción atmosférica, etc. Estas pérdidas están relacionadas directamente con la distancia del radioenlace y la frecuencia de funcionamiento mediante la siguiente expresión:

$$L_{bas}(\text{dB}) = 92.44 + 20 \log_{10} f(\text{GHz}) + 20 \log_{10} d(\text{km}) \quad (\text{Fórmula de Friis})$$

#### 4.1.4.1.4 Pérdidas adicionales de propagación.

Aquí se incluyen todas aquellas pérdidas adicionales que sufren las señales radioeléctricas durante su propagación y que no pueden atribuirse al término de pérdidas básicas en espacio libre. De este modo, se tienen pérdidas por absorción atmosférica e hidrometeoros (lluvia, nieve, niebla), fenómenos de difracción (obstrucción parcial o total del haz radioeléctrico), reflexiones, etc.

#### 4.1.4.1.5 Perdidas por lluvia

Las ondas de radio que se propagan a través de una región de lluvia se atenúan como consecuencia de la absorción de potencia que se produce en un medio dieléctrico con pérdidas como es el agua. Adicionalmente, también se producen pérdidas sobre la onda

transmitida debido a la dispersión de parte de la energía del haz que provocan las gotas de lluvia, aunque son menores.

Desde el punto de vista de un ingeniero de comunicaciones que va a diseñar un radioenlace, lo que se necesita es una fórmula sencilla para relacionar la atenuación específica con parámetros tales como la tasa de lluvia, la frecuencia o la temperatura. Afortunadamente esta fórmula existe, y es de la forma:

$$\text{Atenuación específica (dB/km)} = k \cdot R^\alpha$$

Donde R es la tasa de lluvia en mm/h, y k y  $\alpha$  son constantes que dependen de la frecuencia y de la temperatura de la lluvia. La dependencia con la temperatura se debe a la variación de la constante dieléctrica del agua con la temperatura. Los valores exactos de las constantes k y  $\alpha$  han sido obtenidos por Olsen, Rodgers y Hodge, quienes han establecido fórmulas empíricas para una temperatura de 0 °C a partir de datos experimentales. Como es lógico, se observa que la atenuación crece con R y es mayor para frecuencias superiores. Dado que las longitudes de los tramos de visión directa suelen ser de 10 a 20 km, atenuaciones por lluvia del orden de 1 dB/km o superiores conducen a disminuciones apreciables en el nivel de señal. Para compensarlo es necesario aumentar la ganancia de las antenas o la potencia transmitida, lo cual resulta bastante costoso en el caso de incrementos de 20-30 dB.

Finalmente, conviene indicar que las pérdidas por lluvia son sensibles a la polarización de la señal transmitida, siendo algo mayores en el caso de polarización horizontal. Esto se debe a la forma adoptada por las gotas de lluvia al caer, e implica que en el caso de libertad en el diseño del sistema suele escogerse la polarización vertical. Algunos valores de las constantes k y alfa en función de la frecuencia y de la polarización se listan en la siguiente tabla:

Frecuencia(GHz)	k H	k V	Alfa H	Alfa V
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
2	0,000154	0,000138	0,963	0,923
4	0,000650	0,000591	1,121	1,075
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0335	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,187	0,167	1,021	1,000
40	0,350	0,310	0,939	0,929
60	0,707	0,642	0,826	0,824

Tabla 4.1 *Tabla de factores para calculo de Atenuación específica*

Aunque la atenuación causada por la lluvia puede despreciarse para frecuencias por debajo de 5 GHz, ésta debe incluirse en los cálculos de diseño a frecuencias superiores donde su importancia aumenta rápidamente.

#### **4.1.4.1.6 Perdidas por niebla.**

La atenuación por niebla de las microondas y de las ondas milimétricas está gobernada por las mismas ecuaciones que en el caso de la lluvia. La principal diferencia es que la niebla puede modelarse como un conjunto de gotas de agua muy pequeñas en suspensión con radios variables entre 0,01 y 0,05 mm. Para frecuencias por debajo de 300 GHz la atenuación producida por la niebla es linealmente proporcional al contenido total de agua por unidad de volumen para cada frecuencia. Una concentración de 0,032 g/m<sup>3</sup> corresponde a un nivel de niebla que permite visibilidad a unos 700 m. Por otro lado, una concentración de 0,32 g/m<sup>3</sup> permite visibilidad a algo más de 100 m. El nivel máximo de contenido de agua se sitúa en torno a 1 g/m<sup>3</sup>, con densidades considerablemente menores para la mayor parte de las nieblas. Para una frecuencia de 100 GHz, la atenuación en el caso de niebla densa es de tan sólo 1 dB/km. Por lo tanto, en el diseño de radioenlaces con suficiente margen de señal para evitar la atenuación por lluvia, la niebla no constituirá un factor de limitación.

#### **4.1.4.1.7 Perdidas por vegetación.**

Un factor importante de degradación en sistemas que operan a frecuencias milimétricas, lo constituye la vegetación (árboles, arbustos, etc.) existente en las inmediaciones del radioenlace. En esta situación, el campo electromagnético presente en la antena receptora puede modelarse como la suma de la onda proveniente directamente del transmisor, y multitud de pequeñas ondas dispersadas por los edificios adyacentes y por las hojas de los árboles cercanos. Dado que las fases de estas ondas son aleatorias, las señales resultantes pueden estimarse mediante análisis estadístico. El resultado final de sumar todas estas pequeñas contribuciones es un proceso Gaussiano cuya amplitud (potencia instantánea) sigue una distribución de Rayleigh. Si a continuación se añade la contribución del rayo directo, entonces la estadística de la amplitud de la señal se modela por medio de una distribución de Nakagami-Rice.

#### **4.1.4.2 Calculo del radioenlace.**

Los cálculos se basan en las ecuaciones planteadas en la sección 4.1.

- Potencia transmitida.

$$P(dBm) = 10 \log_{10} \frac{P(W)}{0.001}$$

El modulo de transmisión esta formado por un AP cuya potencia de salida es 31.623 mW y un amplificador de 1W, por lo tanto la potencia transmitida es:

$$P(dBm) = 10 \log_{10} \frac{(0.031623 + 1)}{0.001} = \mathbf{30.14 \text{ dBm}}$$

- Ganancias de las antenas transmisora y receptora.

$$G(dBi) = G(dBd) + 2.14$$

La antena utilizada tiene una ganancia de 24 dBi por lo que no se hace necesario su cálculo.

- Perdidas básicas de propagación en espacio libre.

$$L_{bas} (dB) = 92.44 + 20 \log_{10} f(GHz) + 20 \log_{10} d(km)$$

Para el enlace de la estación multiparametrica se utiliza el protocolo 802.11 (Wi-Fi) que trabaja en la banda de los 2.4 GHz, este enlace se realiza con línea vista a una distancia de 4.6 km.

$$L_{bas} (dB) = 92.44 + 20 \log_{10} (2.4) + 20 \log_{10} (4.6) = \mathbf{113.3 \text{ dB}}$$

- Perdidas por lluvia.

La polarización de las antenas utilizadas para el enlace es del tipo horizontal, lo cual indica que para el calculo de las perdidas usamos los datos que se encuentran sombreados en la tabla 4.1 a una frecuencia de 2.4 GHz.

Debido a que la frecuencia de transmisión esta debajo de 5 GHz estas perdidas se pueden despreciar según la consideración de la sección 4.1.5.1.

- Perdidas por cables.

Los cables utilizados tienen un rango de perdidas de 1dB a 1.5dB, este dato técnico es proporcionado por el fabricante. La hoja técnica se muestra en el apéndice X

- Perdidas por vegetación.

Ya que ambos puntos del enlace están ubicados en terreno boscoso, se toma en consideración la pérdida por penetración de las ondas en el interior de la vegetación, para su evaluación recomendación UIT-R P833 facilita la grafica de la figura 4.4 que proporciona la atenuación por unidad de longitud en función de la frecuencia y la polarización.

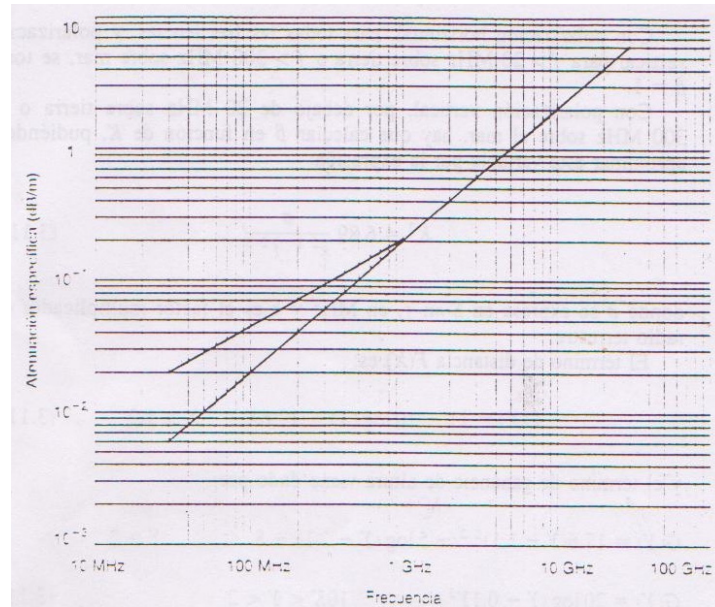


Figura 4.4 *Atenuación por unidad de longitud en función de la frecuencia y la polarización*

Para una frecuencia de 2.4 GHz y un polarización horizontal tenemos una atenuación de 0.04 dB/m, que para una distancia de 4.6 km equivale a **184 dB**.

#### 4.1.4.2.1 Resultados teóricos del radioenlace.

A continuación se resume en la tabla 4.2 los resultados de los cálculos del radioenlace para la estación multiparamétrica.

Potencia transmitida	30.14 dBm
Perdidas básicas de propagación en espacio libre	113.3 dB
Perdida por cables	1dB – 1.5dB
Perdida por vegetación	184 dB

Tabla 4.2 *Resultados de radioenlace.*

#### 4.1.4.2.2 Calculo automatizado del radioenlace.

Para realizar este cálculo se utilizo el software de aplicación **Radiomobile**, que es de libre distribución. Este utiliza el modelo Longley-Rice, el cual se aplica a sistemas punto a punto en un rango de frecuencias de los 40 MHz a los 100MHz, sobre diferentes tipos de terreno. Las pérdidas por transmisión son calculadas usando la geometría de propagación según el perfil del terreno y la refractividad con la troposfera. El software utiliza este modelo para

poder aplicarse en cálculos de pérdidas de propagación de gran escala, relativa a las pérdidas en espacio libre sobre terrenos irregulares para frecuencias entre 20 MHz y 10 GHz.

Este método puede trabajar en dos modos diferentes, uno es cuando se dispone de una detallada descripción del perfil del terreno, como lo hace Radiomobile, facilitando la obtención de los parámetros de propagación, a esto se le conoce como modo de predicción punto a punto. El otro es cuando no se dispone del perfil del terreno, a lo cual el método dispone de técnica para estimar los parámetros específicos, a este modo se le conoce como predicción de área.

En esta sección se presenta el perfil del enlace del punto la estación de procesamiento de datos con la estación multiparamétrica.

Utilizando un GPS en cada punto entre los cuales se estableció el enlace, se obtuvieron las siguientes coordenadas:

- Mirador en el Volcán de Santa Ana.

N: 13° 50' 32.2''      W: 89° 36' 45.6''

- Escuela Fe y alegría (Cerca del lago de coatepeque).

N: 13° 51' 14.8''      W: 89° 34' 21.7''

El programa Radio Mobile ubica los puntos en el mapa como se muestra en la figura 4.1

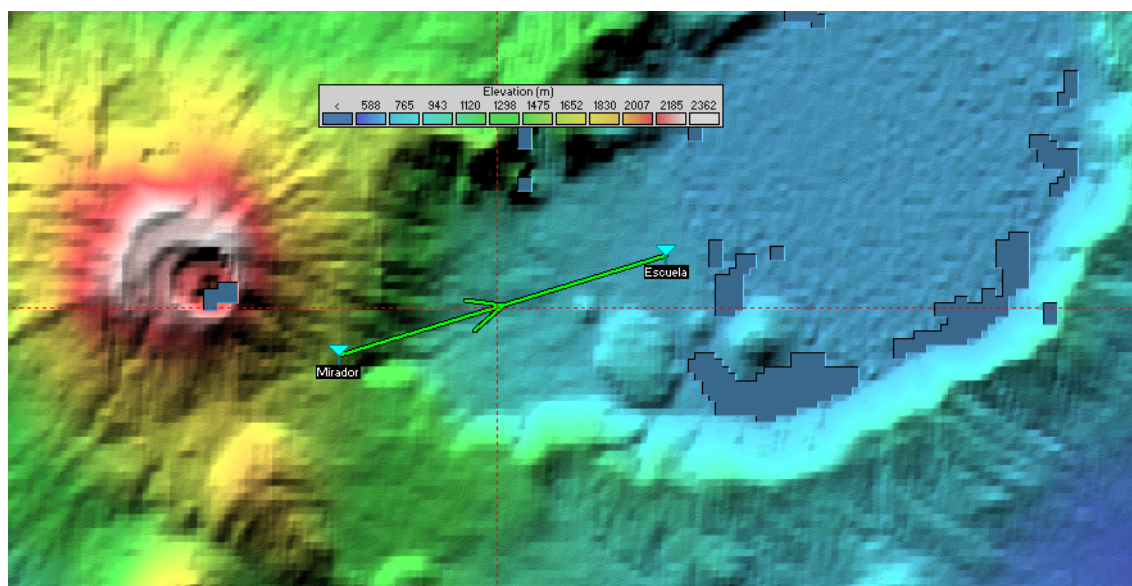


Figura 4.5. Ubicación de los 2 puntos en Radio Mobile

La figura 4.5 presenta la vista superior del mapa de alturas generado por radiomobile en el cual se ubicaron los dos puntos del enlace a establecer. Solo con este gráfico no es suficiente para conocer si resultará el enlace, por eso es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

Para este enlace se esta ocupando el canal 6 de los AP's, cuyo rango de frecuencia es de 2.4 GHz a 2.484 GHz.

Debido a la vegetación en la zona consideramos un 5% de perdidas de la potencia transmitida, además una perdida de 1 dB ocasionado por los cables, con una potencia de transmisión de 1.031 W incluyendo el amplificador.

La ganancia de las antenas parabólicas para Wi-Fi es de 24 dBi. Con estos datos y las coordenadas GPS se obtuvo el perfil del enlace como se muestra en la figura 4.6.

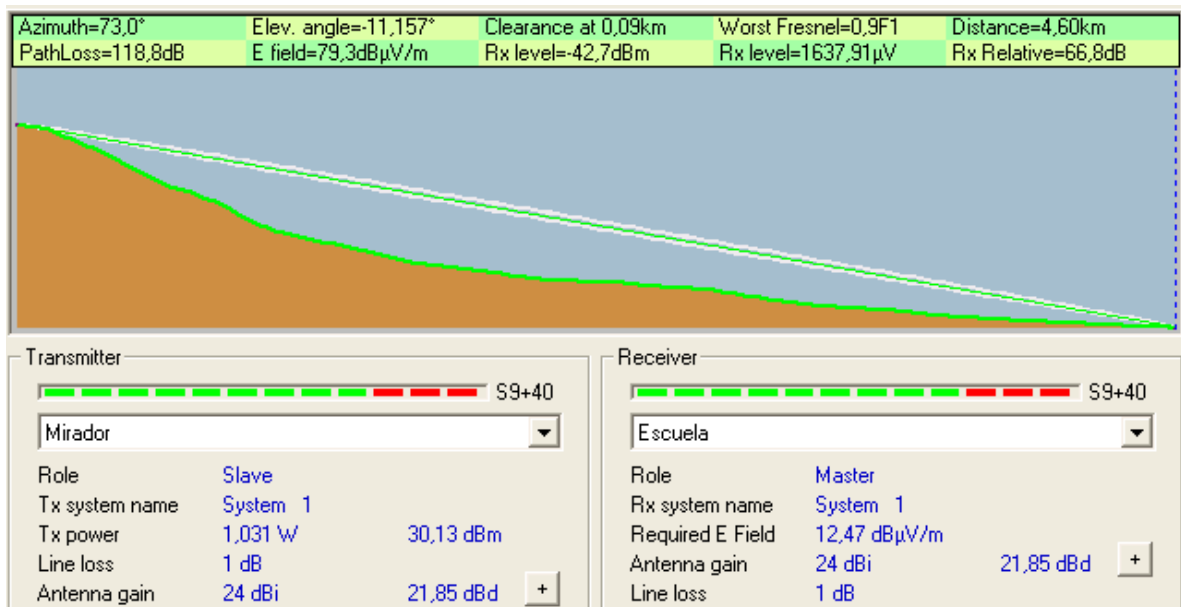


Figura 4.6. Perfil del radioenlace

De los datos podemos resaltar que las perdidas básicas de propagación en espacio libre proporcionadas por el software son bastante similares a las calculadas como se muestra en la tabla 4.7.

<i>Valor Teórico</i>	<i>Radiomobile</i>
<i>113.3 dB</i>	<i>118.8 dB</i>

Figura 4.7 Valores teórico y calculado



## **4.2 PRUEBAS DE CAMPO.**

Idealmente se esperaba realizar estas pruebas entre un punto en el volcán de San Salvador y la Universidad de El Salvador entre los cuales se establecería el radioenlace. Sin embargo se presentaron varios factores que imposibilitaron realizar las pruebas entre dichos lugares. Los factores principales que obligaron a cambiar el lugar de las pruebas de campo fueron las siguientes:

- La falta de un lugar autorizado que presentara emanaciones de CO<sub>2</sub> en el suelo.
- La saturación de señales que pudieron haber interferido en el enlace que se pensaba establecer debido a la excesiva presencia de antenas en la zona.
- La poca visibilidad desde la Universidad hasta el volcán provocada por los edificios y arboles de la zona.

Todo esto obligo a buscar un lugar adecuado que solventara estos inconvenientes el cual se logro ubicar en el volcán de Santa Ana.

### **4.2.1 Descripción del entorno.**

Desde este sitio se hicieron dos pruebas de campo con telemetría y una sin telemetría. En las pruebas que incluyeron al instalación del modulo de comunicación se estableció como punto de referencia para la estación procesadora central la escuela Fe y Alegría y como punto de interés de monitoreo un mirador del Volcán de Santa Ana con línea vista hacia la escuela.

Las pruebas de campo fueron realizadas en días diferentes. La primera de estas se hizo sin utilizar los módulos de radiofrecuencia y las condiciones ambientales eran favorables en todo sentido pues en ningún momento hubo necesidad de proteger el equipo de las lluvias. Posteriormente se hizo la primera prueba con telemetría, en esta las condiciones climatológicas no eran muy favorables a lo que se esperaba, pues principalmente la lluvia y la neblina impedían ubicar de forma visual y con exactitud la línea vista entre los dos puntos. Sin embargo aprovechando los pocos momentos de visibilidad y sosteniendo de forma manual ambas antenas se lograron orientar de forma adecuada hasta establecer el enlace entre los dos puntos. Una vez establecido el enlace se procedió a la realización de las pruebas de la estación multiparametrica. La ultima y definitiva de las pruebas también se realizo con telemetría, durante esta las condiciones ambientales si bien no fueron del todo favorables, no eran tan extremas como la vez anterior ya que se ubicaron fácilmente los dos puntos de forma visual logrando un exitoso enlace RF.

### **4.2.2 Instalación de sensores y estación multiparametrica.**

Primero se realizo pruebas del funcionamiento de la estación instalando todo el equipo en la fumarola, para este caso no se contaba con telemetría, el proceso de monitoreo se hizo

enviando directamente hacia la computadora de procesamiento todos los datos por medio de un cable UTP.

Se conecto cada uno de los sensores a su respectivo borne en la estación multiparametrica, asegurándose que no se generara variaciones de voltaje debido a falsos contactos en los cables.

La cámara de acumulación de gases fue instalada sobre la fumarola, teniendo el cuidado de despejar la superficie de basura y maleza. Debido a que la cámara de acumulación se encontraba alejada del analizador de CO<sub>2</sub>, se utilizo una bomba de succión para llevar el gas hasta este por medio de unas mangueras plásticas semitransparentes cuyo diámetro es de 4 mm, pasando por un filtro que evita el paso de impurezas (partículas de polvo, ceniza, gotas o vapor de agua, etc.) hacia el sensor.

Se instalaron las 2 termocuplas tipo K en sus puntos de medición en la tierra sobre la fumarola, una a 10 cm de profundidad y la otra a 40 cm. También se monto el sensor de temperatura TMP37 a una altura de 1 m sobre la superficie, ya que este se encarga de medir la temperatura del aire.

El geófono se fijo a la superficie mientras que los tres electrodos de cobre se enteraron en el suelo para la medición del potencial espontáneo. La figura 4.8 muestra el montaje de la estación en esta prueba preliminar.



Figura 4.8 *Montaje de sensores y estación multiparametrica.*

En la computadora portátil se observaron los resultados de las mediciones obtenidos al ejecutar el software, los cuales consistieron en lecturas de temperatura de suelo y aire, potencial espontáneo, concentración de CO<sub>2</sub> y la grafica de movimiento de la superficie que el geófono detecta, la secuencia que la cámara de acumulación realizada para el muestreo de la concentración fue ejecutada satisfactoriamente. Los valores observados en la computadora estaban acordes a las condiciones climáticas del momento de la prueba, y las graficas de CO<sub>2</sub> y geófono también fueron aceptables, por lo que se considero exitosa esta prueba.

La instalación de los sensores de la estación multiparamétrica para las pruebas con telemetría se realizó de la misma forma descrita anteriormente salvo variantes de protección del equipo ante la lluvia.

#### 4.2.3 Instalación del módulo de radio.

Habiendo sido comprobado el funcionamiento correcto de la estación multiparamétrica y la veracidad de sus mediciones, se procedió a implementar en las siguientes dos pruebas realizadas el módulo de radiofrecuencia con el fin de establecer un enlace entre dos puntos distantes.

Se escogió un punto suficientemente elevado y despejado de vegetación para lograr una línea vista en el enlace (el punto que cumplía con estas condiciones se encontraba elevado del suelo donde se instaló la estación multiparamétrica aproximadamente 8 m). Este tubo que será ubicado sobre una torre utilizada como mirador turístico. El otro punto estaba ubicado abajo del volcán a las orillas del lago de Coatepeque (específicamente en la escuela Fe y Alegría). La figura 4.9 muestra fotografías de estos dos puntos utilizados para establecer el enlace.



Figura 4.9 *Ubicación de los puntos de enlace. A la izquierda se muestra el mirador turístico y la de la derecha la escuela Fe y Alegría.*

En la primera prueba realizada no se contó con un mástil en ninguno de los dos puntos, sino que la orientación de las antenas se hizo manualmente, no obstante se logró establecer la comunicación entre los dispositivos con relativa facilidad. Durante esta prueba se logró verificar que la tasa de transferencia de paquetes fue óptima pues no se perdía ninguna de las tramas. Sin embargo hubo un problema que impidió probar el buen funcionamiento de todo el sistema, el cual consistió en una ocupación indefinida del puerto COM virtual por parte del sistema operativo de la computadora procesadora central lo que hacía imposible que el software construido en Lab-View procesara los datos.

En la segunda prueba realizada ya se había solucionado el problema del puerto COM virtual y también se instalaron las antenas parabólicas en tubos metálicos de una pulgada

de diámetro, los cuales funcionaron como mástiles. El mástil ubicado en la escuela Fe y Alegría fue sujetado a una estructura metálica del techo de la escuela con alambre de amarre para evitar la desorientación provocada por el viento o movimientos bruscos ocasionados por el quien sostenía la antena durante la primera prueba debido y causado por el error de paralaje. La segunda antena también fue sujetada a un tuvo metálico de similar característica al utilizado en la escuela Fe y Alegría el cual estaba sujetado con alambre de amarre en la estructura de madera del mirador en la parte alta de este.

En ambos puntos del enlace se utilizo amplificadores de Wi-Fi de 1W para estar seguros que la señal irradiada cubriera la distancia total entre los dos puntos sin el riesgo de desvanecimiento de ésta. Además se conectaron los AP's a las antenas parabólicas a través de los amplificadores. Estas conexiones son mostradas en las figuras 4.10 y 4.11.

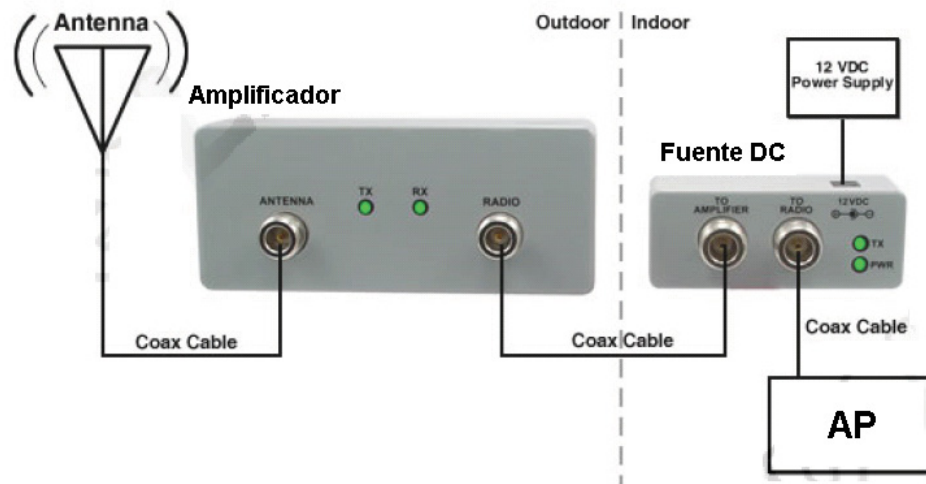


Figura 4.10 Diagrama de conexión entre antena, amplificador y AP en la estación multiparamétrica.

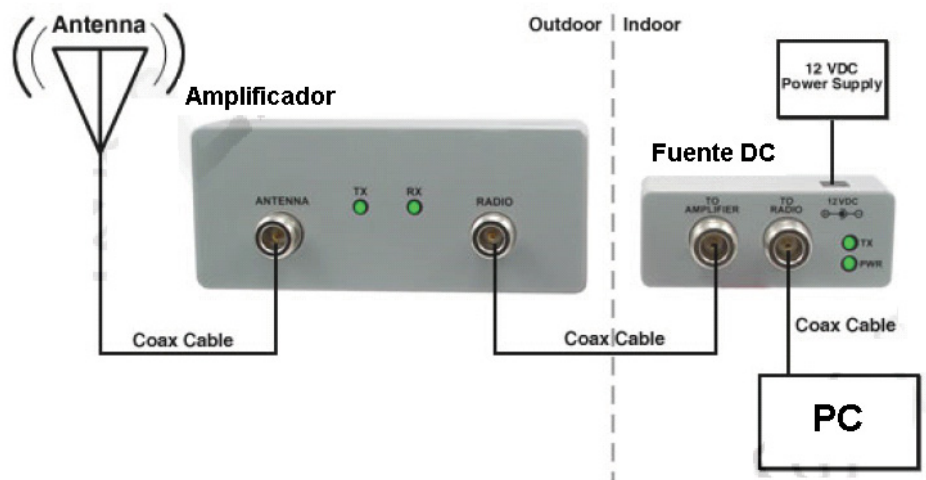


Figura 4.11 Diagrama de conexión entre antena, amplificador y AP en la estación procesadora central.

Se construyeron las extensiones de conexión utilizando cable coaxial RG8 y conectores *BNC* tipo hembra ya que los AP's y los amplificadores tienen conectores del tipo macho, estos se usaron para realizar las conexiones indicadas en las figuras 4.10 y 4.11. A continuación se muestra uno de los cables construidos en la figura 4.12.



Figura 4.12 Cable coaxial utilizado para conectar los módulos de radioenlace.

#### 4.2.4 Enlace remoto.

Se tomo las coordenadas de los dos puntos a enlazar mediante un GPS (Volcán de Santa Ana N: 13° 50' 32.2'', W: 89° 36' 45.6''. Escuela Fe y alegría N: 13° 51' 14.8'', W: 89° 34' 21.7'') para poder orientar las antenas buscando la línea vista entre estas. Se logro una mejor comunicación con al polarización horizontal de las antenas logrando cero perdidas de paquetes según el comando ping de DOS, con esto garantizamos una comunicación entre los dos puntos.

Una vez establecido el enlace, se verificó que el programa de aplicación en Lab-View ejecutándose en la computadora procesadora central, interpretara de forma correcta las lecturas tomadas por la estación multiparametrica en forma de tramas. Se observó que los valores de las temperaturas (suelo y aire) y el nivel de potencial espontáneo eran los correspondientes a la situación climática del volcán en ese momento. También las graficas de concentración de CO<sub>2</sub> y geófono fueron aceptables. Se comprobó que el calculo del enlace realizado previamente en el programa radiomobile es posible en condiciones reales.

### 4.3 RESULTADOS OBTENIDOS.

El resultado de todo el proceso de monitoreo se visualiza en el entorno grafico del programa de aplicación. La imagen de la figura 4.13 fue capturada al momento que la estación multiparametrica mide CO<sub>2</sub>. En la parte inferior de la pantalla del programa se presenta un cuadro de dialogo que indica por medio de mensajes de texto en letras rojas la parte del proceso que el sistema realiza en ese instante. En este momento la cámara de acumulación estuvo cerrada tomando las muestras de CO<sub>2</sub>, los datos de las temperaturas son tomados por el sistema antes de iniciar el proceso de medición de CO<sub>2</sub>, pero se mandan a pedir una vez ha finalizado el proceso de muestreo de CO<sub>2</sub>, donde la termocupla 1 indica

la temperatura del suelo a 40 cm de profundidad y la termocupla 2 la temperatura a una profundidad de 10 cm.

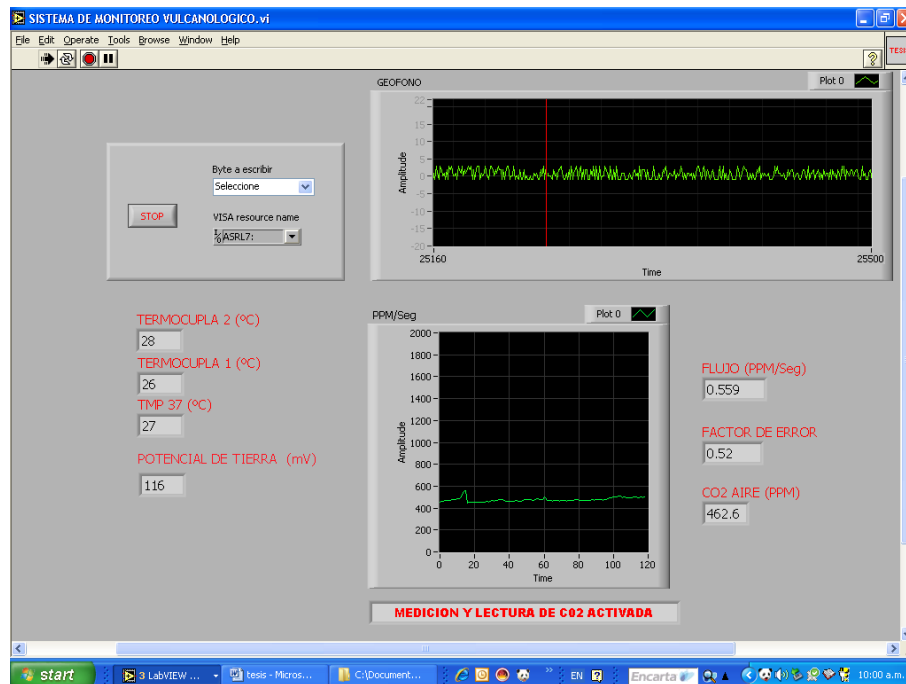


Figura 4.13 Datos mostrados durante medición de CO<sub>2</sub>.

La figura 4.14 muestra la pantalla de los datos dos minutos después de haber finalizado el proceso de medición de CO<sub>2</sub>. Se puede observar en ambas figuras, que los datos de temperatura y potencial de tierra son diferentes, producto de que el sistema mide y envía estos datos cada vez que el proceso de medición de CO<sub>2</sub> finaliza, en este momento los valores para las temperaturas y potencial espontáneo han cambiado y por lo tanto se actualizan. En esta parte solamente se esta monitoreando el comportamiento del geófono y los demás valores serán refrescados hasta la siguiente hora que se repita la medición de CO<sub>2</sub>.

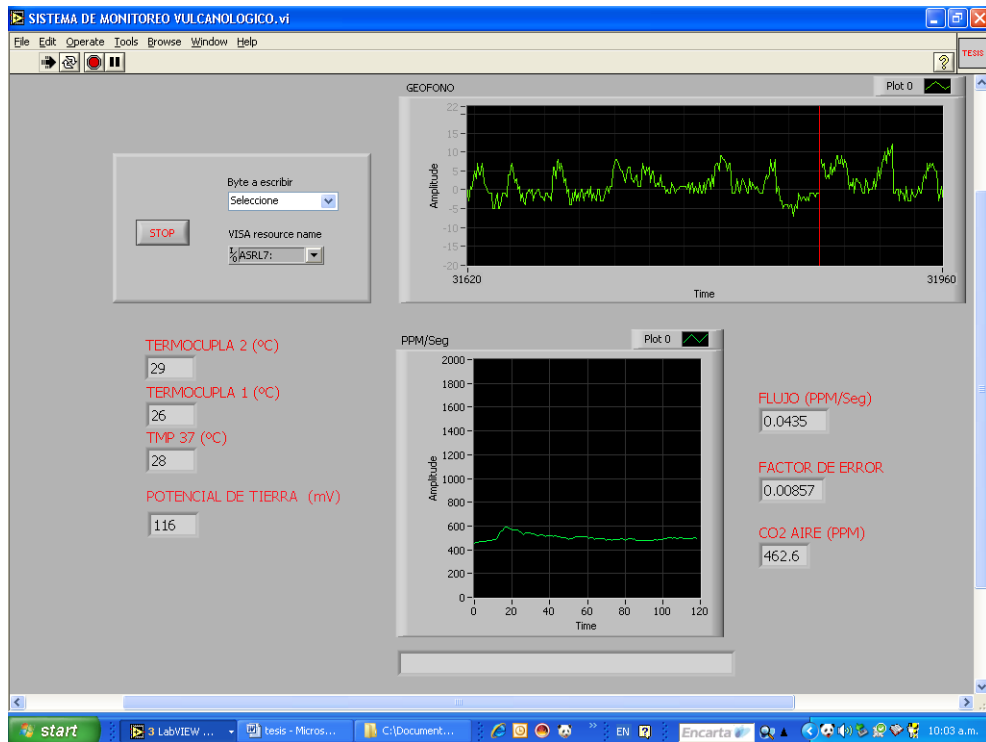


Figura 4.14. Momento en el cual solo se esta midiendo la señal del Geófono.

El software de monitoreo creado en Lab-View tiene la capacidad de crear un archivo en formato *.xls* (formato de las hojas de calculo usado por el programa Microsoft Excel de Office) el cual sirve como un registro histórico de los eventos y datos ocurridos en diferentes instantes de tiempo para su posterior análisis y a la vez sirven como un respaldo al momento de elaborar una predicción. El formato en que se guardan los datos dentro de este archivo se muestra en la figura 4.15.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "DATOS MEDIDOS". The spreadsheet contains a table with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	FECHA -- HORA	PPM/SEG	CO2 AIR	TERMOCUPLA A	TMP37	TERMOCUPLA B	POTENCIAL	
2	16/06/2007--07:02 a.m.	0.092	521.700	25.000	26.000	28.000	115.000	
3	16/06/2007--08:02 a.m.	0.054	492.300	26.000	27.000	29.000	126.000	
4	16/06/2007--09:02 a.m.	0.075	504.200	26.000	28.000	29.000	135.000	
5	16/06/2007--10:02 a.m.	0.043	462.600	26.000	28.000	29.000	116.000	
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								

Figura 4.15 Registro histórico en el archivo Excel DATOS MEDIDOS.xls



#### 4.4 ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL EQUIPO.

La figura 4.16 muestra la vista superior de los dispositivos que conforman la estación multiparamétrica (sin incluir los elementos que conforman el radioenlace). Estos elementos han sido enumerados y se describen a continuación.

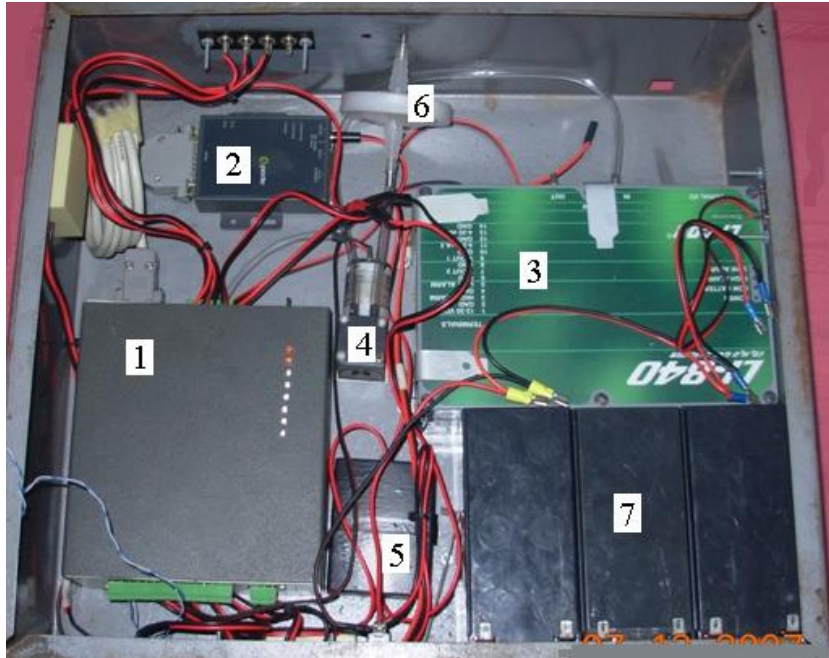


Figura 4.16 *Vista superior de Estación multiparamétrica.*

##### 1) Circuito procesador central.

Este circuito es la parte principal de la estación, ya que se encarga de hacer la lógica necesaria para todos los procesos de medición incluyendo el sistema completo de la cámara de acumulación (motor, bomba y sensores de posición). Dentro de él se encuentran los circuitos de acoplamiento para las señales de cada sensor y también el PIC con su módulo de comunicación RS232. Este circuito cuenta con 8 led indicadores del estado o proceso que se realiza:

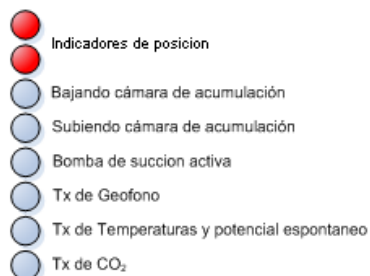


Figura 4.17 *Indicadores de estado o proceso.*

2) Convertidor RS232/Eth.

Este modulo es el encargado de cambiar el protocolo de comunicación de los datos medidos, aquí se convierte la trama RS232 del circuito a una trama Ethernet para que pueda ser compatible con los AP y realizar el enlace. Sin este modulo seria imposible la comunicación de la estación multiparametrica.

3) Analizador de CO<sub>2</sub>.

Este modulo es el que realiza la medición de concentración de CO<sub>2</sub> en la muestra de gas tomada por la cámara de acumulación, este cuenta con una salida analógica proporcional a la concentración en ppm de CO<sub>2</sub>, esta señal analógica es procesada por el circuito principal de la estación.

4) Bomba de succión.

Es la encargada de impulsar el gas desde la cámara de acumulación hacia el analizador de CO<sub>2</sub>.

5) Regulador de voltaje.

Este circuito reduce el nivel de voltaje de 12V DC a 5V DC para alimentar el circuito procesador central y el motor de la cámara de acumulación.

6) Filtro de gas.

Este filtro se coloca a la entrada del analizador de CO<sub>2</sub>, para evitar daños del sensor por impurezas o altas concentraciones de gas u otros elementos.

7) Modulo de energía.

Este modulo es el que proporciona el voltaje a todo el sistema, esta formado por 3 baterías de 12V DC / 7 Ah conectadas en paralelo para obtener la suficiente corriente el sistema demanda.

La cámara de acumulación es la encargada de transportar el gas al analizador para poder obtener las muestras de CO<sub>2</sub>, esta se encuentra montada sobre una base metálica que tiene un soporte para mantener el motor en una posición fija y un agujero por debajo de la cámara de acumulación el cual se ubica sobre la fumarola. Alrededor de este hay un recubrimiento de silicón que permite el sello hermético de cámara. Este se muestra en la figura 4.18.

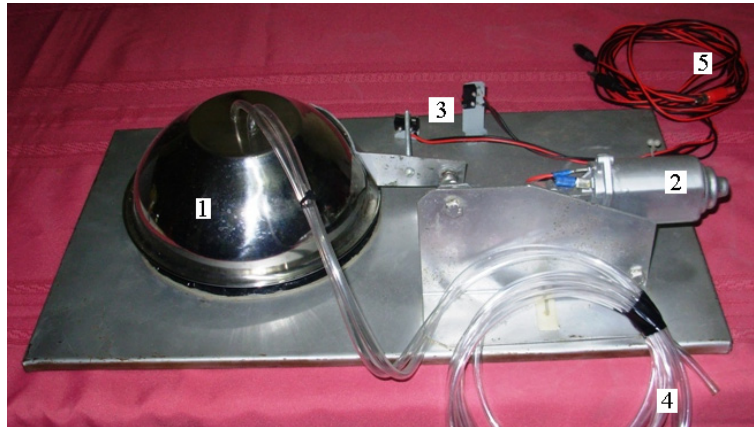


Figura 4.18. *Cámara de acumulación.*

1) Cámara de acumulación.

Esta parte es la que se encarga de acumular el gas para poder ser analizado, de aquí toma la muestra en analizador de CO<sub>2</sub> por medio de las mangueras.

2) Motor.

Este motor de 12V DC tiene la función de abrir y cerrar la cámara de acumulación, este es manejado por el circuito procesador central.

3) Switch indicadores de posición.

Estos switch de final de carrera indican al circuito procesador central la posición en la que se encuentra la cámara de acumulación, en conjunto cuando el switch de arriba esta abierto y el de abajo esta presionado ambos envían un 1 lógico al circuito procesador central indicando que la cámara de acumulación esta en la cerrada, cuando el switch de arriba esta cerrado y el de abajo esta abierto ambos envían un cero lógico indicando que la cámara de acumulación esta abierta.

4) Mangueras transportadoras.

Son las que transportan la muestra de gas desde la cámara de acumulación hasta el analizador de CO<sub>2</sub>, pasando a primero por el filtro de gas.

5) Cables de conexión.

Estos cables sirven para conectar el motor y los switch de posición al circuito procesador central.

#### 4.5 COMPARACION CON SISTEMAS DE TIPO COMERCIAL.

El GIV-UES cuenta con estaciones donadas por organismos internacionales de investigación, estas son de origen italiano y su fabricante es *WestSystems*, dichas estaciones funcionan en diversos puntos de muestreo en 5 volcanes de El Salvador.

##### 4.5.1 Descripción general.

El equipo mostrado en la figura 4.19 esta formado por 1 modulo convertidor analógico a digital, encargado de tomar las señales de los sensores de temperatura y convertirla a formato digital, también tiene un analizador de CO<sub>2</sub> el cual toma las muestras obtenidas por una cámara de acumulación y un modulo de comunicación RF el cual es conectado a una antena tipo yagi para el envío de datos. Todos estos módulos están dentro de una maleta resistente a las condiciones ambientales de operación, la cual queda herméticamente sellada al estar en funcionamiento.



Figura 4.19 Módulos de medición.

En la figura 4.20 se observa un modulo de comunicación RS232 del equipo mediante el cual se pueden descargar de la memoria los datos correspondientes a las lecturas mediante el software proporcionado por el fabricante. También se observan los conectores para las mangueras que transportan el gas de la cámara de acumulación al analizador de CO<sub>2</sub>.



Figura 4.20 Conectores RS232 y CO<sub>2</sub>

La figura 4.21 presenta una alternativa de comunicación del equipo para poder descargar los datos o configuración de este, es un modulo de comunicación *Bluetooth* con el cual se puede tener acceso al equipo mediante una computadora o palm que tengan este tipo de protocolo de comunicación.



Figura 4.21 Modulo de *Bluetooth*.

Este equipo cuenta con una cámara de acumulación de gas para la toma de muestras que el analizador de CO<sub>2</sub> realiza, esta cámara es controlada por un modulo encargado de la automatización del modulo, el diseño de la cámara se muestra en la figura 4.22.

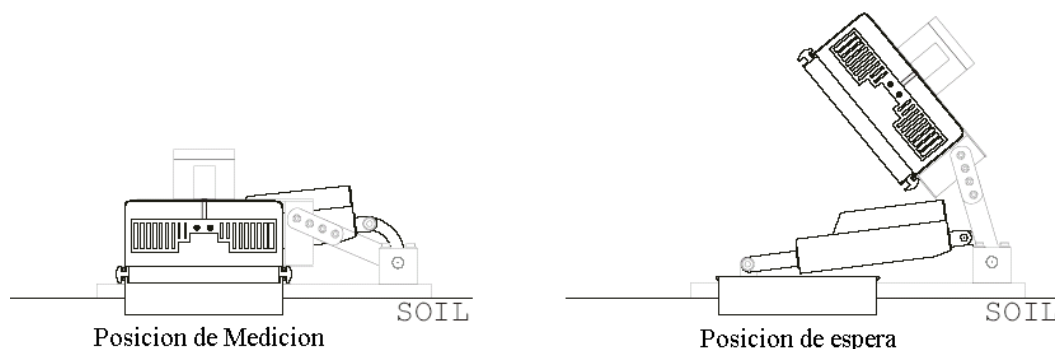


Figura 4.22 *Diseño de la cámara de acumulación de CO<sub>2</sub>.*

#### 4.5.2 Datos generados por la estación comercial

WestSystem proporciona con el equipo un software para configuración de los equipos de medición y análisis de los datos, este es de uso exclusivo para equipos de esta marca. En la figura 4.23 se muestra la ventana principal del software.

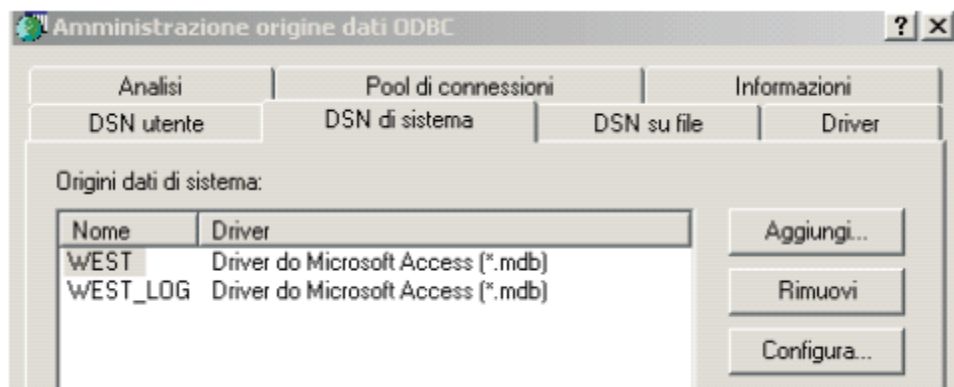


Figura 4.23 *Ventana principal de software.*

Una de las funciones principales es la creación de la base de datos histórica de los datos descargados y su presentación grafica, por ejemplo para la concentración de CO<sub>2</sub> en la muestra se presenta en la figura 4.24.

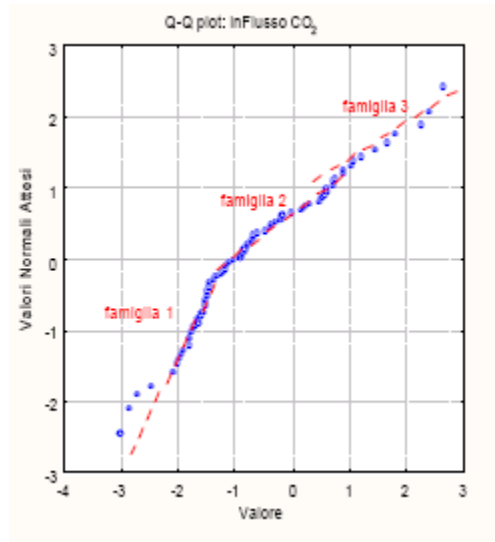


Figura 4.24 *Forma grafica de mostrar resultados*

#### **4.6 CONCLUSIONES.**

- Se comprobó que el prototipo diseñado se acopla a la disponibilidad de energía en los sitios de monitoreo incluyendo las celdas solares, con lo cual se logra la independencia.
- Se ha logrado adaptar la estación multiparamétrica diseñada, al estándar de transmisión Wi-Fi con lo cual se mejora la confiabilidad de los datos y se tiene más ancho de banda para incluir otro tipo de transmisión como por ejemplo una cámara web.
- Aunque el trabajo no se centró en el desarrollo de sensores, es importante destacar que la mayoría de inconvenientes que experimentan este tipo de sistemas está relacionado con la estación multiparamétrica o los elementos de radio asociados a esta. Con el prototipo diseñado se ofrece tecnología de fácil adquisición en el mercado local, lo que fortalece el soporte técnico de este tipo de sistemas.



## **APENDICES**

En esta sección, se proporciona información complementaria a los contenidos presentados a lo largo de todo el documento, entre otros:

- A.** Programa en ensamblador del microcontrolador.
- B.** Flujogramas de los procesos y subprocesos en el programa del PIC
- C.** Configuración del analizador de CO<sub>2</sub> LI-840
- D.** Creación y configuración de un puerto virtual
- E.** Manual básico del usuario
- F.** Configuración del convertidor serial-ethernet IOLAN DS1
- G.** Configuración del Access Point Linksys
- H.** Presupuesto del Prototipo
- I.** Especificaciones técnicas de los diversos elementos utilizados

## APENDICE A

### PROGRAMA EN ENSAMBLADOR DEL PIC16F877A

```
; +-----+
; | UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
; | FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
; | ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
; | CICLO I - 2007
; +-----+
; | PROGRAMA DEL PIC16F877A PARA LA TESIS DE:
; | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO
; +-----+
; | PRESENTADO POR:
; | LEONEL AMÍLCAR LÓPEZ MENDOZA
; | SALVADOR OSWALDO MOLINA ARÉVALO
; | RENÉ ALEXANDER VÍDES RAMÍREZ
; +-----+

; -- VARIABLES GENERALES --
BANCO      EQU    0x20
BYTE       EQU    0x21
DIRECCION  EQU    0x22
GEO_DIR    EQU    0x23
SEGUNDOS_OLD EQU    0x24
TIMER      EQU    0x25
TIMER1     EQU    0x26
TIMER2     EQU    0x27
TIMER3     EQU    0x28
TRAMAS     EQU    0x29
CONTADOR   EQU    0x2A

; -- VARIABLES DEL TMR0 --
TMR0_MULT  EQU    0x2B

; -- VARIABLES DEL RELOJ --
SEGUNDOS   EQU    0x30
MINUTOS    EQU    0x31
HORAS      EQU    0x32

; -- VARIABLES DEL ADC --
CANAL      EQU    0x35
T_ESTABLE  EQU    0x36

; -- VARIABLES DEL USART --
MEM_H      EQU    0x39
MEM_L      EQU    0x3A
TX_DATOS   EQU    0x3B
TX_FSR     EQU    0x3C
RC_DATA    EQU    0x3D

; -- VARIABLES DE CO2 --
CO2_DIR    EQU    0x3F

; == BLOQUE BANCO 0 RESERVADO PARA DATOS TEMP Y POT ==
;           EQU    0x60
;           :
;           :
;           EQU    0x6F

; == BLOQUE BANCO 1 RESERVADO PARA DATOS GEÓFONO ==
;           EQU    0xA0
;           :
;           :
;           EQU    0xEE

; == BLOQUES BANCOS 2 Y 3 RESERVADOS PARA DATOS CO2 ==
;           EQU    0x20
;           :
;           :
;           EQU    0x66
;
;           Y
;
```

```

;
;          EQU    0xA0
;          :      :
;          :      :
;          EQU    0xE6

; -- VARIABLES GLOBALES --
W_TEMP      EQU    0x70
STATUS_TEMP EQU    0x71
PCLATH_TEMP EQU    0x72
CONTROL_1   EQU    0x73
CONTROL_2   EQU    0x74

          ORG    0x00      ; Vector de reset
          GOTO   INICIO

;Vector de interrupción
          ORG    0x04      ; Vector de interrupción
; -- ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE REGISTROS --
          MOVWF  W_TEMP      ; W -> W_TEMP
          COMF  STATUS, W    ; Complemento de STATUS -> W
          MOVWF STATUS_TEMP ; W -> STATUS_TEMP
          MOVLW 1Fh
          ANDWF STATUS, F    ; IRP, RP1, RP0 = 0
          COMF  PCLATH, W    ; Complemento de PCLATH -> W
          MOVWF PCLATH_TEMP ; W -> PCLATH_TEMP
          MOVLW E7h
          ANDWF PCLATH, F    ; PCLATH<4:3> = 0

          BTFSS INTCON, T0IF ; T0IE == 1 ?
          GOTO  USART_RX_INT

TMR0_INT:
          BCF   INTCON, T0IF ; 0 -> T0IE
          BSF   CONTROL_1, 0 ; Leer dato del geófono y guardarlo
          MOVLW D'131'      ; Prepara el TMR0 para 125 conteos
          MOVWF TMR0
          INCFSZ TMR0_MULT, F ; TMR0_MULT = TMR0_MULT + 1
          GOTO  USART_RX_INT
          MOVLW D'131'      ; Prepara TMR0_MULT para 125 conteos
          MOVWF TMR0_MULT
          DECFSZ SEGUNDOS, F ; SEGUNDOS = SEGUNDOS - 1
          GOTO  USART_RX_INT ; Ir al final del vector de interrupción
          MOVLW D'60'
          MOVWF SEGUNDOS    ; 60 -> SEGUNDOS
          DECFSZ MINUTOS, F ; MINUTOS = MINUTOS - 1
          GOTO  USART_RX_INT ; Ir al final del vector de interrupción
          MOVLW D'60'
          MOVWF MINUTOS    ; 60 -> MINUTOS
          DECFSZ HORAS, F   ; HORAS = HORAS - 1
          NOP

END_TMR0_INT

USART_RX_INT:
          BTFSS PIR1, RCIF   ; Se recibió un dato ? (RCIF = 1 ?)
          GOTO  CO2_INT
          BTFSS RCSTA, OERR  ; Verifica si hubo errores de recepción
          GOTO  Rec_Sin_Error ; Si OERR = 0, no hubo error
          BCF   RCSTA, CREN   ; Si OERR = 1, hubo error y se corrige
          BSF   RCSTA, CREN   ; haciendo CREN 0 y luego 1

Rec_Sin_Error
          MOVF  RCREG, W      ; Se copia a W el dato recibido
          MOVWF RC_DATA      ; Se guarda el Byte recibido en RC_DATA
          BSF  CONTROL_1, 7   ; Activar evento de recepción de dato

END_USART_RX_INT

CO2_INT:
          BTFSS CONTROL_2, 0 ; Iniciar control de CO2 ?
          GOTO  FIN_INT
          BTFSS PORTB, 0     ; Switch de arriba liberado ?
          GOTO  END_CO2_INT   ; No, regresar de la interrupción
          BTFSS PORTB, 1     ; Si, Switch de abajo presionado ?
          GOTO  END_CO2_INT   ; No, regresar de la interrupción
          BCF   PORTB, 2     ; Detener el motor
          BTFSS CONTROL_2, 2 ; Están habilitadas las lecturas de CO2
          BSF   CONTROL_2, 1 ; Si, el brazo ha bajado

END_CO2_INT

          BTFSS CONTROL_2, 6 ; Subir el brazo ?
          GOTO  FIN_INT
          BTFSC PORTB, 1     ; Switch de abajo liberado ?

```

```

GOTO FIN_INT ; No, regresar de la interrupción
BTFS PORTB, 0 ; Si, Switch de arriba presionado ?
GOTO FIN_INT ; No, regresar de la interrupción
BCF PORTB, 3 ; Detener motor
BSF CONTROL_2, 7

FIN_INT:
; -- RESTABLECIMIENTO DE REGISTROS TEMPORALES --
COMF PCLATH_TEMP, W ; PCLATH -> W
MOVWF PCLATH_TEMP
COMF STATUS_TEMP, W ; STATUS -> W
MOVWF STATUS_TEMP
SWAPF W_TEMP, F ; SWAP de W_TEMP -> W_TEMP
SWAPF W_TEMP, W ; W original -> W
RETFIE

INICIO:
BCF PCLATH, 3 ; Pagina 0 de la memoria de programa
BCF PCLATH, 4

; -- CONFIGURACION DE LOS PUERTOS DE E/S --
BSF STATUS, RP0 ; BANCO 1
BCF STATUS, RP1
MOVLW B'00101111' ; Para el ADC configurar PORTA y PORTE
MOVWF TRISA ; PORTA configurado como entrada
MOVLW B'00000011'
MOVWF TRISB ; PORTB<1:0> entradas, PORTB<7:2> salidas
CLR TRISC ; PORTC como salida
BSF TRISC,6 ; Para el USART configurar PORTC<7:6>
BSF TRISC,7 ; PORTC<7:6> son entradas
CLR TRISD ; PORTD como salida
MOVLW B'00000001'
MOVWF TRISE ; PORTE configurado como entrada
BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
BCF STATUS, RP1
BSF PORTA, 4 ; Poner 1 en RA4
CLR PORTB ; Pone a 0 todos los pines de PORTB
MOVLW B'00111111'
MOVWF PORTC ; Poner 1 en los bits PORTC<5:0>
MOVLW B'11111111'
MOVWF PORTD ; Poner 1 en todos los pines de PORTD
MOVLW B'00000110'
MOVWF PORTE ; Poner 1 en los bits PORTE<2:1>

; -- CONFIGURACIÓN DEL TMR0 --
CLR TRISD ; Inicializa el TMR0
BSF STATUS, RP0 ; BANCO 1
BCF STATUS, RP1
MOVLW B'10000101' ; Preescaler de 64 al TMR0
MOVWF OPTION_REG ; transicion positiva, PULL-UPS/dis
BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
BCF STATUS, RP1
MOVLW D'131' ; Prepara el TMR0 y el TMR0_MULT
MOVWF TMR0_MULT ; para hacer 125 conteos cada uno
MOVLW D'131'
MOVWF TMR0 ; Tiempo = Preescaler x TMR0 x TMR0_MULT
; Tiempo = 64 x 125 x 125 = 1000000 us
BSF INTCON, T0IE ; Habilita la interrupción del TMR0
BSF INTCON, GIE ; Habilita las interrupciones globales

; -- CONFIGURACIÓN DEL RELOJ --
BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
BCF STATUS, RP1
MOVLW D'60'
MOVWF SEGUNDOS ; 60 -> SEGUNDOS
MOVLW D'60'
MOVWF MINUTOS ; 60 -> MINUTOS
MOVLW D'12'
MOVWF HORAS ; 12 -> HORAS

; -- CONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL --
BSF STATUS, RP0 ; BANCO 1
BCF STATUS, RP1
MOVLW B'00001001' ; Canales AN0-AN5 habilitados
MOVWF ADCON1 ; resultado justificado a la Izquierda
BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
BCF STATUS, RP1
MOVLW B'11000000'

```

```

MOVWF  ADCON0          ; Reloj de conversión derivado del XT

; -- CONFIGURACIÓN DEL USART --
BSF     STATUS, RP0    ; BANCO 1
BCF     STATUS, RP1
MOVLW  D'25'          ; Velocidad 19200 (12 decimal),
MOVWF   SPBRG         ; Velocidad 9600 (25 decimal)
BSF     TXSTA, BRGH   ; BRGH = 1
BSF     TXSTA, TXEN   ; TXEN = 1
BCF     TXSTA, SYNC   ; SYNC = 0
BSF     PIE1, RCIE    ; Habilitar interrupción del USART RX
BSF     INTCON, PEIE
BCF     STATUS, RP0    ; BANCO 0
BCF     STATUS, RP1
BSF     RCSTA, SPEN   ; SPEN = 1
BSF     RCSTA, CREN   ; CREN = 1

; -- INICIALIZACIÓN DE VARIABLES DE CONTROL --
BCF     STATUS, RP0    ; BANCO 0
BCF     STATUS, RP1    ; Encabezado y cola de la trama de
MOVLW  'T'            ; Temperaturas y Potencial de Tierra
MOVWF  0x60
MOVLW  'M'
MOVWF  0x61
MOVLW  'P'
MOVWF  0x62
MOVLW  'P'
MOVWF  0x63
MOVLW  'O'
MOVWF  0x64
MOVLW  'T'
MOVWF  0x65
MOVLW  ':'
MOVWF  0x66
MOVWF  0x6B
MOVLW  'E'
MOVWF  0x6C
MOVLW  'N'
MOVWF  0x6D
MOVLW  'D'
MOVWF  0x6E
MOVLW  D'255'
MOVWF  0x6F

BSF     STATUS, RP0    ; BANCO 1
BCF     STATUS, RP1    ; Encabezado y cola de la trama de
MOVLW  'G'            ; datos del geófono
MOVWF  0xA0
MOVLW  'E'
MOVWF  0xA1
MOVLW  'O'
MOVWF  0xA2
MOVLW  ':'
MOVWF  0xA3
MOVWF  0xE4
MOVLW  'E'
MOVWF  0xE5
MOVLW  'N'
MOVWF  0xE6
MOVLW  'D'
MOVWF  0xE7
MOVLW  D'255'
MOVWF  0xE8
MOVLW  0Ah
MOVWF  0xE9
MOVLW  0Dh
MOVWF  0xEA
MOVLW  '+'
MOVWF  0xEB
MOVLW  'A'
MOVWF  0xEC
MOVLW  'D'
MOVWF  0xED
MOVLW  'D'
MOVWF  0xEE

BCF     STATUS, RP0    ; BANCO 2
BSF     STATUS, RP1    ; Encabezado y cola de los primeros
MOVLW  'C'            ; 60 datos del CO2
MOVWF  0x20

```

```

MOVLW '0'
MOVWF 0x21
MOVLW '2'
MOVWF 0x22
MOVLW ' '
MOVWF 0x23
MOVLW '1'
MOVWF 0x24
MOVLW ':'
MOVWF 0x25
MOVWF 0x62
MOVLW 'E'
MOVWF 0x63
MOVLW 'N'
MOVWF 0x64
MOVLW 'D'
MOVWF 0x65
MOVLW D'255'
MOVWF 0x66
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x67
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x68

BSF STATUS, RP0 ; BANCO 3
BSF STATUS, RP1 ; Encabezado y cola de los ultimos
MOVLW 'C' ; 60 datos del geofono
MOVWF 0xA0
MOVLW 'O'
MOVWF 0xA1
MOVLW '2'
MOVWF 0xA2
MOVLW ' '
MOVWF 0xA3
MOVLW '2'
MOVWF 0xA4
MOVLW ':'
MOVWF 0xA5
MOVWF 0xE2
MOVLW 'E'
MOVWF 0xE3
MOVLW 'N'
MOVWF 0xE4
MOVLW 'D'
MOVWF 0xE5
MOVLW D'255'
MOVWF 0xE6
MOVLW 0Ah
MOVWF 0xE7
MOVLW 0Dh
MOVWF 0xE8

; -- VARIABLES DE CONTROL DE TIEMPOS DE LA CÁMARA DE ACUMULACIÓN
BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
BCF STATUS, RP1
MOVLW 0x24
MOVWF GEO_DIR
MOVLW 0x26
MOVWF CO2_DIR
MOVLW D'11' ; Temporizador 1 del CO2
MOVWF TIMER1
MOVLW D'120' ; Temporizador 2 del CO2
MOVWF TIMER2
MOVLW D'11' ; Temporizador 3 del CO2
MOVWF TIMER3
CLRF SEGUNDOS_OLD

CALL PROBAR ; Colocar el brazo en posición vertical
BSF CONTROL_1, 6 ; Activar el menú de diagnóstico

MODO_TEXTO CALL MENU
OPCIÓN BTFSF CONTROL_1, 6
GOTO OPCION

PRINCIPAL: NOP
MOVF CONTROL_1, W ; CONTROL_1 -> W
BTFSF STATUS, Z ; Evento pendiente ?
GOTO PRINCIPAL
CALL EVENTOS_CTRL_1 ; Ejecutar eventos pendientes encontrados
; en el registro CONTROL_1

```

```

        BTFSF CONTROL_1, 6 ; Ir al modo texto ?
        GOTO MODO_TEXTO
        GOTO PRINCIPAL

EVENTOS_CTRL_1:
        NOP
EVEN_CTRL_1_7
        BTFSF CONTROL_1, 7 ; Ha entrada un dato ?
        GOTO EVEN_CTRL_1_0
        BCF CONTROL_1, 7
EVEN_CTRL_1_7_1
        MOVLW 3Ch
        XORWF RC_DATA, W ; El dato recibido es 60 (<)?
        BTFSF STATUS, Z
        GOTO EVEN_CTRL_1_7_2
        BSF CONTROL_1, 2 ; Activar lectura de temperaturas y potencial
        CLRF RC_DATA
        RETURN
EVEN_CTRL_1_7_2
        MOVLW 3Eh
        XORWF RC_DATA, W ; El dato recibido es 62 (>)?
        BTFSF STATUS, Z
        GOTO EVEN_CTRL_1_7_3
        BSF CONTROL_1, 3 ; Activar transmisión de temperaturas y pot.
        CLRF RC_DATA
        RETURN
EVEN_CTRL_1_7_3
        MOVLW 40h
        XORWF RC_DATA, W ; El dato recibido es 64 (@)?
        BTFSF STATUS, Z
        GOTO EVEN_CTRL_1_7_4
        BSF CONTROL_1, 4 ; Activar lectura de CO2
        CLRF RC_DATA
        RETURN
EVEN_CTRL_1_7_4
        MOVLW 42h
        XORWF RC_DATA, W ; El dato recibido es 66 (B)?
        BTFSF STATUS, Z
        GOTO EVEN_CTRL_1_7_5
        BSF CONTROL_1, 5 ; Activar transmisión de CO2.
        CLRF RC_DATA
        RETURN
EVEN_CTRL_1_7_5
        MOVLW 50h
        XORWF RC_DATA, W ; El dato recibido es 80 (P)?
        BTFSF STATUS, Z
        GOTO FIN_EVEN_CTRL_1_7
        BSF CONTROL_1, 6 ; Regresar al modo texto
FIN_EVEN_CTRL_1_7
        CLRF RC_DATA
        RETURN

EVEN_CTRL_1_0
        BTFSF CONTROL_1, 0 ; Leer dato geófono ?
        GOTO EVEN_CTRL_1_1 ; No. probar siguiente evento
        BCF CONTROL_1, 0
        BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
        BCF STATUS, RP1
        CLRF CANAL ; Limpiar las variables a utilizar
        CLRF BANCO
        CLRF DIRECCION
        CLRF BYTE
        MOVLW D'4' ; Por el canal 0 del ADC se lee los
        MOVWF CANAL ; datos del geófono
        CALL CONVERSION_ADC
        MOVLW D'1' ; En el BANCO 1 se guardan las
        MOVWF BANCO ; lecturas del geófono <0xA0:0xE4>
        MOVF GEO_DIR, W ; Se carga la dirección del byte
        MOVWF DIRECCION ; superior de la conversión
        MOVF ADRESH, W
        MOVWF BYTE ; ADRESH -> BYTE
        CALL ESCRIBIR_BYTE
        INCF GEO_DIR, F ; GEO_DIR = GEO_DIR + 1
        MOVF GEO_DIR, W ; Apuntar a la siguiente posición
        MOVWF DIRECCION ; de memoria
        BSF STATUS, RP0 ; BANCO 1
        BCF STATUS, RP1
        MOVF ADRESL, W
        BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0

```

```

BCF STATUS, RP1
MOVWF BYTE ; ADRESL -> BYTE
CALL ESCRIBIR_BYTE
INCF GEO_DIR, F ; GEO_DIR = GEO_DIR + 1
MOVLW 0x64
XORWF GEO_DIR, W ; Trama de datos completa ?
BTFSS STATUS, Z
GOTO FIN_EVEN_CTRL_1_0
MOVLW 0x24 ; Reiniciar direcciones de la trama
MOVWF GEO_DIR ; del geófono
BSF CONTROL_1, 1 ; Activar transmision datos geófono
FIN_EVEN_CTRL_1_0
CLRF CANAL ; Limpiar las variables utilizadas
CLRF BANCO
CLRF DIRECCION
CLRF BYTE
RETURN

EVEN_CTRL_1_1
BTFSS CONTROL_1, 1 ; Transmitir datos del geofono ?
GOTO EVEN_CTRL_1_2 ; No. probar siguiente evento
BSF PORTB, 5
BCF CONTROL_1, 1
BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
BCF STATUS, RP1
CLRF BANCO ; Limpiar variables a utilizar
CLRF MEM_L
CLRF MEM_H
MOVLW D'1'
MOVWF BANCO
MOVLW 0x20
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x6A
BTFSC TRAMAS, 0
MOVLW 0x6E
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
BCF TRAMAS, 0
FIN_EVEN_CTRL_1_1
CLRF BANCO ; Limpiar variables a utilizar
CLRF MEM_L
CLRF MEM_H
BCF PORTB, 5
RETURN

EVEN_CTRL_1_2
BTFSS CONTROL_1, 2 ; Leer temperaturas y potencial ?
GOTO EVEN_CTRL_1_3 ; No. probar siguiente evento
BCF CONTROL_1, 2
BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
BCF STATUS, RP1
CLRF CANAL ; Limpiar las variables a utilizar
CLRF BANCO
CLRF DIRECCION
CLRF BYTE
MOVLW D'0' ; Los datos de temperatura y potencial
MOVWF BANCO ; se guardan en el banco 0 <0x67:0x6A>
MOVLW 0x67 ; A partir de esta dirección se
MOVWF DIRECCION ; escriben los datos
MOVLW D'0' ; Hacer la lectura de temperatura a
MOVWF CANAL ; 10 cm bajo tierra por el canal 0
CALL CONVERSION_ADC
MOVF ADRESH, W ; ADRESH -> W
MOVWF BYTE ; Guardar dato de temperatura en RAM
CALL ESCRIBIR_BYTE
INCF DIRECCION, F ; Apuntar a la siguiente posición de memoria
MOVLW D'1' ; Hacer lectura de temperatura ambiente
MOVWF CANAL ; por el canal 1
CALL CONVERSION_ADC
MOVF ADRESH, W ; ADRESH -> W
MOVWF BYTE ; Guardar dato de temperatura en RAM
CALL ESCRIBIR_BYTE
INCF DIRECCION, F ; Apuntar a la siguiente posición de memoria
MOVLW D'2' ; Hacer lectura de temperatura a
MOVWF CANAL ; 40 cm bajo tierra por el canal 2
CALL CONVERSION_ADC
MOVF ADRESH, W ; ADRESH -> W
MOVWF BYTE ; Guardar dato de temperatura en RAM
CALL ESCRIBIR_BYTE
INCF DIRECCION, F ; Apuntar a la siguiente posición de memoria

```



```

        MOVLW D'5'           ; Hacer lectura de potencial de tierra
        MOVWF CANAL         ; por el canal 5
        CALL  CONVERSION_ADC
        MOVF  ADRESH, W     ; ADRESH -> W
        MOVWF BYTE         ; Guardar dato de potencial en RAM
        CALL  ESCRIBIR_BYTE
FIN_EVEN_CTRL_1_2
        CLRF  CANAL         ; Limpiar las variables a utilizar
        CLRF  BANCO
        CLRF  DIRECCION
        CLRF  BYTE
        RETURN

EVEN_CTRL_1_3
        BTFSS CONTROL_1, 3 ; Transmitir datos temperatura y potencial ?
        GOTO  EVEN_CTRL_1_5 ; No. probar siguiente evento
        BSF  PORTB, 6
        BCF  CONTROL_1, 3
        BCF  STATUS, RP0   ; BANCO 0
        BCF  STATUS, RP1
        CLRF  BANCO         ; Limpiar variables a utilizar
        CLRF  MEM_L
        CLRF  MEM_H
        MOVLW D'0'
        MOVWF BANCO
        MOVLW 0x60
        MOVWF MEM_L
        MOVLW 0x6F
        MOVWF MEM_H
        CALL  ENVIAR_BLOQUE
FIN_EVEN_CTRL_1_3
        CLRF  BANCO         ; Limpiar variables a utilizar
        CLRF  MEM_L
        CLRF  MEM_H
        BCF  PORTB, 6
        RETURN

EVEN_CTRL_1_5
        BTFSS CONTROL_1, 5 ; Transmitir datos CO2 ?
        GOTO  EVEN_CTRL_1_4 ; No. probar siguiente evento
        BSF  PORTB, 7
        BCF  CONTROL_1, 5
        BCF  STATUS, RP0   ; BANCO 0
        BCF  STATUS, RP1
        CLRF  BANCO         ; Limpiar variables a utilizar
        CLRF  MEM_L
        CLRF  MEM_H
        MOVLW D'2'         ; Enviar primer trama de CO2
        MOVWF BANCO
        MOVLW 0x20
        MOVWF MEM_L
        MOVLW 0x61
        MOVWF MEM_H
        CALL  ENVIAR_BLOQUE
        MOVLW D'3'         ; Enviar segunda trama de CO2
        MOVWF BANCO
        MOVLW 0x26
        MOVWF MEM_L
        MOVLW 0x68
        MOVWF MEM_H
        CALL  ENVIAR_BLOQUE
FIN_EVEN_CTRL_1_5
        CLRF  BANCO         ; Limpiar variables a utilizar
        CLRF  MEM_L
        CLRF  MEM_H
        BCF  PORTB, 7
        RETURN

EVEN_CTRL_1_4
        BTFSS CONTROL_1, 4 ; Leer dato de CO2 ?
        GOTO  EVEN_CTRL_1_6 ; No. probar siguiente evento
CO2_INIT
        MOVF  SEGUNDOS_OLD, W
        XORWF SEGUNDOS, W  ; SEGUNDOS == SEGUNDOS_OLD ?
        BTFSC STATUS, Z
        GOTO  CO2_END      ; SI
        BTFSC CONTROL_2, 7 ; El brazo está arriba ?
        GOTO  FIN_LEER_CO2 ; Si, regresar de la rutina
                          ; No, el brazo ya está abajo

```

```

BTFFS PORTB, 4 ; NO. Está encendida la bomba ?
BSF PORTB, 4 ; No, encenderla
MOVF SEGUNDOS, W ; Si
MOVWF SEGUNDOS_OLD ; SEGUNDOS_OLD = SEGUNDOS
DECFSZ TIMER1, F ; TIMER1 = TIMER1 - 1
GOTO LEER_CO2
BTFFS CONTROL_2, 1 ; Está abajo el brazo ?
GOTO CO2_END
BSF PORTB, 2
BSF CONTROL_2, 0 ; Bajar el brazo

LEER_CO2
BTFFS CONTROL_2, 0 ; Se ha ordenado bajar el brazo ?
GOTO CO2_END ; No
BTFFS CONTROL_2, 1 ; Si, bajarlo. Ya ha bajado ?
GOTO CO2_END ; No
BTFFS PORTB, 2 ; Si. Está detenido el motor ?
BCF PORTB, 2 ; No, detenerlo
MOVLW D'3' ; Si
MOVWF CANAL ; CANAL = 3
CALL CONVERSION_ADC
MOVF CO2_DIR, W
MOVWF DIRECCION ; DIRECCION = CO2_DIR
MOVF ADRESH, W
MOVWF BYTE ; BYTE = ADRESH
BTFFS CONTROL_2, 4 ; Escribir en el banco 2 ?
GOTO CO2_BANCO_2 ; Si
BTFFS CONTROL_2, 4 ; No. Escribir en el banco 3 ?
GOTO CO2_BANCO_3 ; Si

CO2_BANCO_2
MOVLW D'2' ; Seleccionar el banco 2
MOVWF BANCO
GOTO LEER_CO2_CONT

CO2_BANCO_3
MOVLW D'3' ; Seleccionar el banco 3
MOVWF BANCO

LEER_CO2_CONT
CALL ESCRIBIR_BYTE ; Guardar el dato en el byte
INCF CO2_DIR, F ; CO2_DIR = CO2_DIR + 1
MOVLW 0x62
XORWF CO2_DIR, W ; CO2_DIR == 0x62 ?
BTFFS STATUS, Z
GOTO FIN_LEER_CO2
MOVLW 0x26
MOVWF CO2_DIR ; CO2_DIR = 0x26
BTFFS CONTROL_2, 4
BSF PORTB, 3
BTFFS CONTROL_2, 4
BSF CONTROL_2, 6
BTFFS CONTROL_2, 4
GOTO FIN_LEER_CO2
BSF CONTROL_2, 4 ; Escribir en el banco 3
GOTO CO2_END

FIN_LEER_CO2
BTFFS CONTROL_2, 7
GOTO CO2_END
MOVF SEGUNDOS_OLD, W ; W = SEGUNDOS_OLD
XORWF SEGUNDOS, W ; SEGUNDOS == SEGUNDOS_OLD ?
BTFFS STATUS, Z
GOTO CO2_END ; NO, ir a CO2_END
MOVF SEGUNDOS, W
MOVWF SEGUNDOS_OLD ; SEGUNDOS_OLD = SEGUNDOS
BTFFS PORTB, 3 ; Se ha detenido el motor ?
BCF PORTB, 3 ; No, detenerlo
DECFSZ TIMER3, F ; Si. TIMER3 = TIMER3 - 1
GOTO CO2_END
BCF PORTB, 4 ; Apagar bomba
CLRF CONTROL_2
CLRF SEGUNDOS_OLD
MOVLW 0x26
MOVWF CO2_DIR
MOVLW D'11'
MOVWF TIMER1
MOVWF TIMER3
BCF CONTROL_1, 4
BSF TRAMAS, 0

CO2_END
NOP
FIN_EVEN_CTRL_1_4
RETURN

```

```

EVEN_CTRL_1_6
    BTFSS CONTROL_1, 6
    RETURN
    RETURN

; *** RUTINA DE CONVERSIÓN DEL ADC ***
; --- Argumento:
; * Canal de la conversión -> CANAL
; --- Resultados:
;   Conversión en ADRESH<1:0> + ADRESL<7:0>
;   Argumento en W | Canal Activo
; -----+-----+-----+-----
; | Decimal | Hexa | Nombre | Pin |
; -----+-----+-----+-----
; | 0 | 00h | AN0 | RA0 |
; | 1 | 01h | AN1 | RA1 |
; | 2 | 02h | AN2 | RA2 |
; | 3 | 03h | AN3 | RA3 |
; | 4 | 04h | AN4 | RA5 |
; | 5 | 05h | AN5 | RE0 |
; | 6 | 06h | AN6 | RE1 |
; | 7 | 07h | AN7 | RE2 |

CONVERSION_ADC:
    BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
    BCF STATUS, RP1
    BCF STATUS, C ; Poner a 0 el bit C de STATUS
    BCF STATUS, DC ; Poner a 0 el bit DC de STATUS
    SWAPF CANAL, F ; Colocar en los bits <5:3> de CANAL
    RRF CANAL, F ; el número del canal de conversión
    MOVLW B'11000111'
    ANDWF ADCON0, F ; Poner canal 0 por defecto
    MOVF CANAL, W ; CANAL -> W
    ADDWF ADCON0, F ; Colocar en ADCON0<5:3> el canal seleccionado
    BSF ADCON0, ADON ; Encender el ADC
    MOVLW D'25'
    MOVWF T_ESTABLE
Tiempo_de_estabilización
    DECFSZ T_ESTABLE, F ; T_ESTABLE = T_ESTABLE - 1
    GOTO Tiempo_de_estabilización
    BSF ADCON0, 2 ; Iniciar la conversión

Convirtiendo
    BTFSC ADCON0, 2 ; Conversión en proceso?
    GOTO Convirtiendo ; Si, esperar
    BCF ADCON0, ADON ; No, apagar el ADC

FIN_CONVERSION_ADC
    RETURN

; *** RUTINA DE TRANSMISIÓN DE UN BLOQUE DE MEMORIA ***
; --- Argumentos:
; * Banco del bloque de memoria -> BANCO
; * Dirección inicial del bloque de memoria -> MEM_L
; * Dirección final del bloque de memoria -> MEM_H
; --- Resultados:
;   Todos los Bytes comprendidos entre MEM_L y MEM_H se transmiten via
;   serie por los pines RC7 y RC6 a la velocidad configurada en el USART
ENVIAR_BLOQUE:
    BCF STATUS, RP0 ; BANCO 0
    BCF STATUS, RP1
    MOVLW B'00000011'
    ANDWF BANCO, F
    MOVF MEM_L, W ; MEM_L -> W
    SUBWF MEM_H, W ; MEM_H - MEM_L -> W
    MOVWF TX_DATOS ; W -> TX_DATOS (Total de datos a enviar)
    INCF TX_DATOS, F ; TX_DATOS = TX_DATOS + 1
    MOVF MEM_L, W ; MEM_L -> W
    MOVWF TX_FSR ; W -> TX_FSR
    MOVWF FSR ; MEM_L -> FSR

Siguiente_Dato
    BTFSC BANCO, 0 ; Seleccionar el banco donde se
    BSF FSR, 7 ; encuentran los datos
    BTFSC BANCO, 1
    BSF STATUS, IRP
    MOVF INDF, W ; INDF -> W
    BCF STATUS, IRP ; BANCO 0
    BCF FSR, 7
    MOVWF TXREG ; INDF -> TXREG

```

```

                DECFSZ TX_DATOS, F      ; TX_DATOS = TX_DATOS - 1
                GOTO   TXREG_FULL
                GOTO   FIN_ENVIAR
TXREG_FULL
                BTFSS  PIR1, TXIF      ; TXIF = 1?
                GOTO   TXREG_FULL
                INCF   TX_FSR, F      ; TX_FSR = TX_FSR + 1
                MOVF   TX_FSR, W
                MOVWF  FSR
                GOTO   Siguiente_Dato
FIN_ENVIAR
                BSF    STATUS, RP0     ; BANCO 1
                BCF    STATUS, RP1
TSR_FULL
                BTFSS  TXSTA, TRMT     ; TRMT = 1?
                GOTO   TSR_FULL       ; Si es 0, el registro está lleno y
                                        ; debe esperar a que se vacíe
                BCF    STATUS, RP0     ; BANCO 0
                BCF    STATUS, RP1

                CLRF   BANCO          ; BANCO = 0
                CLRF   MEM_H          ; MEM_H = 0
                CLRF   MEM_L          ; MEM_L = 0
                CLRF   FSR            ; FSR = 0
FIN_ENVIAR_BLOQUE
                RETURN

; *** RUTINA PARA ESCRIBIR UN BYTE EN CUALQUIER PARTE DE LA RAM ***
; --- Argumento:
; * Banco de la memoria en donde se va a escribir -> BANCO
; * Dirección de la memoria donde de va a escribir -> DIRECCION <0x20:0x6F>
; * Byte que se va a escribir -> BYTE
; --- Resultados: 0
ESCRIBIR_BYTE:
                BCF    STATUS, RP0     ; BANCO 0
                BCF    STATUS, RP1
                MOVLW  B'00000011'
                ANDWF  BANCO, F
                MOVF  DIRECCION, W    ; DIRECCION -> W
                MOVWF FSR              ; DIRECCION -> FSR
                MOVF  BYTE, W         ; Carga a W el Byte a escribir
                BTFSC BANCO, 0        ; Seleccionar el banco donde se
                BSF   FSR, 7          ; va a escribir es dato
                BTFSC BANCO, 1
                BSF   STATUS, IRP
                MOVWF INDF            ; BYTE -> INDF
                BCF   STATUS, IRP     ; BANCO 0
                BCF   FSR, 7
FIN_ESCRIBIR_BYTE
                RETURN

; *** RUTINA PARA LLENAR UN BLOQUE DE LA RAM CON UN MISMO DATO ***
; --- Argumento:
; * Banco de la memoria en donde se va a escribir -> BANCO
; * Bloque de la memoria donde de va a escribir -> MEM_L y MEM_H
; * Byte que se va a escribir -> BYTE
; --- Resultados: 0
ESCRIBIR_BLOQUE:
                BCF    STATUS, RP0     ; BANCO 0
                BCF    STATUS, RP1
                MOVLW  B'00000011'
                ANDWF  BANCO, F
                MOVF  MEM_L, W
                SUBWF MEM_H, W        ; MEM_H - MEM_L -> W
                MOVWF CONTADOR        ; W -> CONTADOR (Total de datos a enviar)
                INCF  CONTADOR, F     ; CONTADOR = CONTADOR + 1
                MOVF  MEM_L, W        ; MEM_L -> W
                MOVWF FSR              ; MEM_L -> FSR
                MOVF  BYTE, W         ; Carga a W el Byte a escribir
                BTFSC BANCO, 0        ; Seleccionar el banco donde se
                BSF   FSR, 7          ; va a escribir es dato
                BTFSC BANCO, 1
                BSF   STATUS, IRP
ESCRIBIR_OTRO_BYTE
                MOVWF INDF            ; BYTE -> INDF
                DECFSZ CONTADOR, F    ; CONTADOR = CONTADOR - 1
                GOTO  ESCRIBIENDO
                GOTO  FIN_ESCRIBIR_BLOQUE

```

```

ESCRIBIENDO      INCF   FSR, F           ; Apuntar a la siguiente posición de memoria
                 GOTO   ESCRIBIR_OTRO_BYTE
FIN_ESCRIBIR_BLOQUE
                 CLRF   CONTADOR       ; CONTADOR = 0
                 BCF   STATUS, IRP     ; BANCO 0
                 BCF   FSR, 7
                 RETURN

; *** SUBROUTINA PARA SUBIR EL BRAZO AL INICIO DEL PROGRAMA ***
SUBIR_BRAZO:
                 BCF   STATUS, RP0
                 BCF   STATUS, RP1     ; Banco 0
                 BSF   PORTB, 3

Brazo_Abajo:
                 BTFSC  PORTB, 1
                 GOTO   Brazo_Abajo

Brazo_Subiendo:
                 BTFSC  PORTB, 0
                 GOTO   Brazo_Subiendo
                 BCF   PORTB, 3
                 RETURN

; *** SUBROUTINA PARA BAJAR EL BRAZO AL INICIO DEL PROGRAMA ***
BAJAR_BRAZO:
                 BCF   STATUS, RP0
                 BCF   STATUS, RP1     ; Banco 0
                 BSF   PORTB, 2

Brazo_Arriba:
                 BTFSS  PORTB, 0
                 GOTO   Brazo_Arriba

Brazo_Bajando:
                 BTFSS  PORTB, 1
                 GOTO   Brazo_Bajando
                 BCF   PORTB, 2
                 RETURN

; *** SUBROUTINA DE PRUEBA DE ESTADO DE INDICADORES, MOTOR Y BOMBA ***
PROBAR:
                 BSF   PORTB, 7       ; Encender LED de transmisión de CO2
                 BSF   PORTB, 6       ; Encender LED de transmisión de
                                     ; temperaturas y potencial
                 BSF   PORTB, 5       ; Encender LED de transmisión del
                                     ; geófono
                 BSF   PORTB, 4       ; Encender Bomba
                 CALL  BAJAR_BRAZO
                 CALL  SUBIR_BRAZO
                 BCF   PORTB, 4       ; Apagar Bomba
                 BCF   PORTB, 7       ; Apagar LED TX de CO2
                 BCF   PORTB, 6       ; Apagar LED TX de Temperaturas y pot
                 BCF   PORTB, 5       ; Apagar LED TX del geófono
                 RETURN

; *** SUBROUTINA DEL MENÚ DE DIAGNÓSTICO Y PRUBAS EN MODO TEXTO ***
MENU:           NOP
PANTALLA_1
                 CALL  LINEA_NOMBRE
                 CALL  LINEA OPCIONES
                 CALL  LINEA_1
                 CALL  LINEA_2
                 CALL  LINEA_3
                 CALL  LINEA_SALIR_1
                 CALL  LINEA_SALIR_2
                 CALL  LINEA_SALIR_3
                 CALL  LINEA_ELECCION
                 CLRF  RC_DATA

ESPERAR_COMANDO
COMANDO_0      MOVLW  '0'
                 XORWF RC_DATA, W
                 BTFSS STATUS, Z     ; Se ha presionado el número 0 ?
                 GOTO  COMANDO_SWITCH
                 MOVLW 08h
                 MOVWF 0x40
                 MOVLW '0'
                 MOVWF 0x41
                 MOVLW 0x40

```

```

MOVWF MEM_L
MOVLW 0x41
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
CALL LINEA_INICIAR
BCF CONTROL_1, 6
RETURN ; Si, salir del menú e iniciar
; el sistema de monitoreo

COMANDO_SWITCH
BTFSS PORTB, 1 ; Se ha presionado el switch
; de abajo ?

GOTO COMANDO_1
MOVLW 08h
MOVWF 0x40
MOVLW 'S'
MOVWF 0x41
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x41
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
CALL LINEA_INICIAR
BCF CONTROL_1, 6
RETURN ; Si, salir del menú e iniciar
; el sistema de monitoreo

COMANDO_1
MOVLW '1'
XORWF RC_DATA, W
BTFSS STATUS, Z ; Probar el sistema ?
GOTO COMANDO_2
MOVLW 08h
MOVWF 0x40
MOVLW '1'
MOVWF 0x41
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x41
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
CALL PROBAR ; Si
CALL LINEA_SISTEMA_OK
CLRF RC_DATA
GOTO PANTALLA_1

COMANDO_2
MOVLW '2'
XORWF RC_DATA, W
BTFSS STATUS, Z ; Enviar datos en memoria ?
GOTO COMANDO_3
NOP
MOVLW 08h
MOVWF 0x40
MOVLW '2'
MOVWF 0x41
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x41
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
MOVLW H'0A'
MOVWF 0x40
MOVLW H'0D'
MOVWF 0x41
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x41
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
CLRF CONTROL_1
MOVLW H'0A'
MOVWF 0x40
MOVLW H'0D'
MOVWF 0x41
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x41
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
BSF CONTROL_1, 1 ; Habilitar TX de geófono
CALL EVENTOS_CTRL_1
CLRF CONTROL_1
BSF CONTROL_1, 3 ; Habilitar TX de Temp y Pot
CALL EVENTOS_CTRL_1

```

```

        CLRf    CONTROL_1
        MOVLW  H'0A'
        MOVWF  0x40
        MOVLW  H'0D'
        MOVWF  0x41
        MOVLW  0x40
        MOVWF  MEM_L
        MOVLW  0x41
        MOVWF  MEM_H
        CALL   ENVIAR_BLOQUE
        BSF    CONTROL_1, 5 ; Habilitar TX de CO2
        CALL   EVENTOS_CTRL_1
        CALL   LINEA_TRANSFERENCIA_OK
        CLRf   RC_DATA
        GOTO   PAÑTALLA_1
COMANDO_3
        MOVLW  '3'
        XORWF  RC_DATA, W
        BTFSZ  STATUS, Z ; Borrar Datos ?
        GOTO   FIN_COMANDOS
        NOP
        MOVLW  08h
        MOVWF  0x40
        MOVLW  '3'
        MOVWF  0x41
        MOVLW  0x40
        MOVWF  MEM_L
        MOVLW  0x41
        MOVWF  MEM_H
        CALL   ENVIAR_BLOQUE
        MOVLW  D'0' ; Limpiar datos de temperaturas y
        MOVWF  BANCO ; potencial de tierra almacenados
        CLRf   BYTE ; dentro del banco 0
        MOVLW  0x67
        MOVWF  MEM_L
        MOVLW  0x6A
        MOVWF  MEM_H
        CALL   ESCRIBIR_BLOQUE
        MOVLW  D'1' ; Limpiar datos del geófono almace-
        MOVWF  BANCO ; nados dentro del banco 1
        CLRf   BYTE
        MOVLW  0x0A4
        MOVWF  MEM_L
        MOVLW  0x0E3
        MOVWF  MEM_H
        CALL   ESCRIBIR_BLOQUE
        MOVLW  D'2' ; Limpiar los primeros 60 datos de
        MOVWF  BANCO ; CO2 almacenados dentro del banco 2
        CLRf   BYTE
        MOVLW  0x026
        MOVWF  MEM_L
        MOVLW  0x061
        MOVWF  MEM_H
        CALL   ESCRIBIR_BLOQUE
        MOVLW  D'3' ; Limpiar los ultimos 60 datos de
        MOVWF  BANCO ; CO2 almacenados dentro del banco 3
        CLRf   BYTE
        MOVLW  0x0A6
        MOVWF  MEM_L
        MOVLW  0x0E1
        MOVWF  MEM_H
        CALL   ESCRIBIR_BLOQUE
        CLRf   BANCO
        CALL   LINEA_DATOS_BORRADOS
        CLRf   RC_DATA
        GOTO   PAÑTALLA_1
FIN_COMANDOS
        GOTO   ESPERAR_COMANDO
        RETURN

```

```

; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "INSTRUMENTO DE MONITOREO"
LINEA_NOMBRE

```

```

        MOVLW  0Ch
        MOVWF  0x40
        MOVLW  0Ah
        MOVWF  0x41
        MOVLW  'I'
        MOVWF  0x42
        MOVLW  'N'
        MOVWF  0x43
        MOVLW  'S'

```

```

MOVWF 0x44
MOVLW 'T'
MOVWF 0x45
MOVLW 'R'
MOVWF 0x46
MOVLW 'U'
MOVWF 0x47
MOVLW 'M'
MOVWF 0x48
MOVLW 'E'
MOVWF 0x49
MOVLW 'N'
MOVWF 0x4A
MOVLW 'T'
MOVWF 0x4B
MOVLW 'O'
MOVWF 0x4C
MOVLW ' '
MOVWF 0x4D
MOVLW 'D'
MOVWF 0x4E
MOVLW 'E'
MOVWF 0x4F
MOVLW ' '
MOVWF 0x50
MOVLW 'M'
MOVWF 0x51
MOVLW 'O'
MOVWF 0x52
MOVLW 'N'
MOVWF 0x53
MOVLW 'I'
MOVWF 0x54
MOVLW 'T'
MOVWF 0x55
MOVLW 'O'
MOVWF 0x56
MOVLW 'R'
MOVWF 0x57
MOVLW 'E'
MOVWF 0x58
MOVLW 'O'
MOVWF 0x59
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x5A
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x5B
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x5C
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x5D
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x5D
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN

```

```

; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "Presione un numero:"
LINEA OPCIONES

```

```

MOVLW 0Ah
MOVWF 0x40
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x41
MOVLW 'P'
MOVWF 0x42
MOVLW 'r'
MOVWF 0x43
MOVLW 'e'
MOVWF 0x44
MOVLW 's'
MOVWF 0x45
MOVLW 'i'
MOVWF 0x46
MOVLW 'o'
MOVWF 0x47
MOVLW 'n'
MOVWF 0x48
MOVLW 'e'
MOVWF 0x49

```



```

MOVLW    ' '
MOVWF    0x4A
MOVLW    'u'
MOVWF    0x4B
MOVLW    'n'
MOVWF    0x4C
MOVLW    ' '
MOVWF    0x4D
MOVLW    'n'
MOVWF    0x4E
MOVLW    'u'
MOVWF    0x4F
MOVLW    'm'
MOVWF    0x50
MOVLW    'e'
MOVWF    0x51
MOVLW    'r'
MOVWF    0x52
MOVLW    'o'
MOVWF    0x53
MOVLW    ':'
MOVWF    0x54
MOVLW    ' '
MOVWF    0x55
MOVLW    0Ah
MOVWF    0x56
MOVLW    0Dh
MOVWF    0x57
MOVLW    0x40
MOVWF    MEM_L
MOVLW    0x57
MOVWF    MEM_H
CALL     ENVIAR_BLOQUE
RETURN

```

```

; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "1. Probar Sistema"
LINEA_1

```

```

MOVLW    07h
MOVWF    0x40
MOVLW    '1'
MOVWF    0x41
MOVLW    '.'
MOVWF    0x42
MOVLW    ' '
MOVWF    0x43
MOVLW    'P'
MOVWF    0x44
MOVLW    'r'
MOVWF    0x45
MOVLW    'o'
MOVWF    0x46
MOVLW    'b'
MOVWF    0x47
MOVLW    'a'
MOVWF    0x48
MOVLW    'r'
MOVWF    0x49
MOVLW    ' '
MOVWF    0x4A
MOVLW    'S'
MOVWF    0x4B
MOVLW    'i'
MOVWF    0x4C
MOVLW    's'
MOVWF    0x4D
MOVLW    't'
MOVWF    0x4E
MOVLW    'e'
MOVWF    0x4F
MOVLW    'm'
MOVWF    0x50
MOVLW    'a'
MOVWF    0x51
MOVLW    0Ah
MOVWF    0x52
MOVLW    0Dh
MOVWF    0x53
MOVLW    0x40
MOVWF    MEM_L
MOVLW    0x53

```

```
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN
```

```
; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "2. Enviar Datos en Memoria"
LINEA_2
```

```
MOVLW '2'
MOVWF 0x40
MOVLW '.'
MOVWF 0x41
MOVLW ' '
MOVWF 0x42
MOVLW 'E'
MOVWF 0x43
MOVLW 'n'
MOVWF 0x44
MOVLW 'v'
MOVWF 0x45
MOVLW 'i'
MOVWF 0x46
MOVLW 'a'
MOVWF 0x47
MOVLW 'r'
MOVWF 0x48
MOVLW ' '
MOVWF 0x49
MOVLW 'D'
MOVWF 0x4A
MOVLW 'a'
MOVWF 0x4B
MOVLW 't'
MOVWF 0x4C
MOVLW 'o'
MOVWF 0x4D
MOVLW 's'
MOVWF 0x4E
MOVLW ' '
MOVWF 0x4F
MOVLW 'e'
MOVWF 0x50
MOVLW 'n'
MOVWF 0x51
MOVLW ' '
MOVWF 0x52
MOVLW 'M'
MOVWF 0x53
MOVLW 'e'
MOVWF 0x54
MOVLW 'm'
MOVWF 0x55
MOVLW 'o'
MOVWF 0x56
MOVLW 'r'
MOVWF 0x57
MOVLW 'i'
MOVWF 0x58
MOVLW 'a'
MOVWF 0x59
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x5A
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x5B
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x5B
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN
```

```
; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "3. Borrar Datos en Memoria"
LINEA_3
```

```
MOVLW '3'
MOVWF 0x40
MOVLW '.'
MOVWF 0x41
MOVLW ' '
MOVWF 0x42
MOVLW 'B'
MOVWF 0x43
```

```

MOVLW 'o'
MOVWF 0x44
MOVLW 'r'
MOVWF 0x45
MOVLW 'r'
MOVWF 0x46
MOVLW 'a'
MOVWF 0x47
MOVLW 'r'
MOVWF 0x48
MOVLW ' '
MOVWF 0x49
MOVLW 'D'
MOVWF 0x4A
MOVLW 'a'
MOVWF 0x4B
MOVLW 't'
MOVWF 0x4C
MOVLW 'o'
MOVWF 0x4D
MOVLW 's'
MOVWF 0x4E
MOVLW ' '
MOVWF 0x4F
MOVLW 'e'
MOVWF 0x50
MOVLW 'n'
MOVWF 0x51
MOVLW ' '
MOVWF 0x52
MOVLW 'M'
MOVWF 0x53
MOVLW 'e'
MOVWF 0x54
MOVLW 'm'
MOVWF 0x55
MOVLW 'o'
MOVWF 0x56
MOVLW 'r'
MOVWF 0x57
MOVLW 'i'
MOVWF 0x58
MOVLW 'a'
MOVWF 0x59
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x5A
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x5B
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x5B
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN

```

```

; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "Para salir presione el switch"
LINEA_SALIR_1

```

```

MOVLW 0Ah
MOVWF 0x40
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x41
MOVLW 'P'
MOVWF 0x42
MOVLW 'a'
MOVWF 0x43
MOVLW 'r'
MOVWF 0x44
MOVLW 'a'
MOVWF 0x45
MOVLW ' '
MOVWF 0x46
MOVLW 's'
MOVWF 0x47
MOVLW 'a'
MOVWF 0x48
MOVLW 'l'
MOVWF 0x49
MOVLW 'i'
MOVWF 0x4A
MOVLW 'r'

```

```
MOVWF 0x4B
MOVLW ' '
MOVWF 0x4C
MOVLW 'p'
MOVWF 0x4D
MOVLW 'r'
MOVWF 0x4E
MOVLW 'e'
MOVWF 0x4F
MOVLW 's'
MOVWF 0x50
MOVLW 'i'
MOVWF 0x51
MOVLW 'o'
MOVWF 0x52
MOVLW 'n'
MOVWF 0x53
MOVLW 'e'
MOVWF 0x54
MOVLW ' '
MOVWF 0x55
MOVLW 'e'
MOVWF 0x56
MOVLW 'l'
MOVWF 0x57
MOVLW ' '
MOVWF 0x58
MOVLW 's'
MOVWF 0x59
MOVLW 'w'
MOVWF 0x5A
MOVLW 'i'
MOVWF 0x5B
MOVLW 't'
MOVWF 0x5C
MOVLW 'c'
MOVWF 0x5D
MOVLW 'h'
MOVWF 0x5E
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x5E
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN
```

```
; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "de abajo del brazo o Presione"
LINEA_SALIR_2
```

```
    MOVLW    0Ah
    MOVWF    0x40
    MOVLW    0Dh
    MOVWF    0x41
    MOVLW    'd'
    MOVWF    0x42
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x43
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x44
    MOVLW    'a'
    MOVWF    0x45
    MOVLW    'b'
    MOVWF    0x46
    MOVLW    'a'
    MOVWF    0x47
    MOVLW    'j'
    MOVWF    0x48
    MOVLW    'o'
    MOVWF    0x49
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x4A
    MOVLW    'd'
    MOVWF    0x4B
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x4C
    MOVLW    'l'
    MOVWF    0x4D
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x4E
    MOVLW    'b'
    MOVWF    0x4F
    MOVLW    'r'
    MOVWF    0x50
    MOVLW    'a'
    MOVWF    0x51
    MOVLW    'z'
    MOVWF    0x52
    MOVLW    'o'
    MOVWF    0x53
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x54
    MOVLW    'o'
    MOVWF    0x55
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x56
    MOVLW    'P'
    MOVWF    0x57
    MOVLW    'r'
    MOVWF    0x58
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x59
    MOVLW    's'
    MOVWF    0x5A
    MOVLW    'i'
    MOVWF    0x5B
    MOVLW    'o'
    MOVWF    0x5C
    MOVLW    'n'
    MOVWF    0x5D
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x5E
    MOVLW    0x40
    MOVWF    MEM_L
    MOVLW    0x5E
    MOVWF    MEM_H
    CALL    ENVIAR_BLOQUE
    RETURN
```

```
; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "el numero 0"
LINEA_SALIR_3
```

```
    MOVLW    0Ah
    MOVWF    0x40
    MOVLW    0Dh
    MOVWF    0x41
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x42
    MOVLW    'l'
```

```

MOVWF 0x43
MOVLW ' '
MOVWF 0x44
MOVLW 'n'
MOVWF 0x45
MOVLW 'u'
MOVWF 0x46
MOVLW 'm'
MOVWF 0x47
MOVLW 'e'
MOVWF 0x48
MOVLW 'r'
MOVWF 0x49
MOVLW 'o'
MOVWF 0x4A
MOVLW ' '
MOVWF 0x4B
MOVLW '0'
MOVWF 0x4C
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x4D
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x4D
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN

```

; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena

; "Numero: "

LINEA\_ELECCION

```

MOVLW 0Ah
MOVWF 0x40
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x41
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x42
MOVLW 'N'
MOVWF 0x43
MOVLW 'u'
MOVWF 0x44
MOVLW 'm'
MOVWF 0x45
MOVLW 'e'
MOVWF 0x46
MOVLW 'r'
MOVWF 0x47
MOVLW 'o'
MOVWF 0x48
MOVLW ':'
MOVWF 0x49
MOVLW ' '
MOVWF 0x4A
MOVLW ' '
MOVWF 0x4B
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x4B
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN

```

; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena

; "Iniciando Monitoreo ..."

LINEA\_INICIAR

```

MOVLW 0Ah
MOVWF 0x40
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x41
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x42
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x43
MOVLW 'I'
MOVWF 0x44
MOVLW 'n'
MOVWF 0x45
MOVLW 'i'
MOVWF 0x46
MOVLW 'c'
MOVWF 0x47

```

```
MOVLW 'i'
MOVWF 0x48
MOVLW 'a'
MOVWF 0x49
MOVLW 'n'
MOVWF 0x4A
MOVLW 'd'
MOVWF 0x4B
MOVLW 'o'
MOVWF 0x4C
MOVLW ' '
MOVWF 0x4D
MOVLW 'M'
MOVWF 0x4E
MOVLW 'o'
MOVWF 0x4F
MOVLW 'n'
MOVWF 0x50
MOVLW 'i'
MOVWF 0x51
MOVLW 't'
MOVWF 0x52
MOVLW 'o'
MOVWF 0x53
MOVLW 'r'
MOVWF 0x54
MOVLW 'e'
MOVWF 0x55
MOVLW 'o'
MOVWF 0x56
MOVLW ' '
MOVWF 0x57
MOVLW '.'
MOVWF 0x58
MOVLW '.'
MOVWF 0x59
MOVLW '.'
MOVWF 0x5A
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x5B
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x5C
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x5C
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN
```

```
; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "Sistema Funcionando Bien.."
LINEA_SISTEMA_OK
```

```
    MOVLW    0Ah
    MOVWF    0x40
    MOVLW    0Dh
    MOVWF    0x41
    MOVLW    0Dh
    MOVWF    0x42
    MOVLW    0Dh
    MOVWF    0x43
    MOVLW    'S'
    MOVWF    0x44
    MOVLW    'i'
    MOVWF    0x45
    MOVLW    's'
    MOVWF    0x46
    MOVLW    't'
    MOVWF    0x47
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x48
    MOVLW    'm'
    MOVWF    0x49
    MOVLW    'a'
    MOVWF    0x4A
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x4B
    MOVLW    'F'
    MOVWF    0x4C
    MOVLW    'u'
    MOVWF    0x4D
    MOVLW    'n'
    MOVWF    0x4E
    MOVLW    'c'
    MOVWF    0x4F
    MOVLW    'i'
    MOVWF    0x50
    MOVLW    'o'
    MOVWF    0x51
    MOVLW    'n'
    MOVWF    0x52
    MOVLW    'a'
    MOVWF    0x53
    MOVLW    'n'
    MOVWF    0x54
    MOVLW    'd'
    MOVWF    0x55
    MOVLW    'o'
    MOVWF    0x56
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x57
    MOVLW    'B'
    MOVWF    0x58
    MOVLW    'i'
    MOVWF    0x59
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x5A
    MOVLW    'n'
    MOVWF    0x5B
    MOVLW    '.'
    MOVWF    0x5C
    MOVLW    '.'
    MOVWF    0x5D
    MOVLW    0Ah
    MOVWF    0x5E
    MOVLW    0Dh
    MOVWF    0x5F
    MOVLW    0x40
    MOVWF    MEM_L
    MOVLW    0x5F
    MOVWF    MEM_H
    CALL     ENVIAR_BLOQUE
    RETURN
```

```
; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "Envío de Datos Perfecto..."
LINEA_TRANSFERENCIA_OK
```

```
    MOVLW    0Ah
    MOVWF    0x40
    MOVLW    0Dh
    MOVWF    0x41
```



```

MOVLW 0Dh
MOVWF 0x42
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x43
MOVLW 'E'
MOVWF 0x44
MOVLW 'n'
MOVWF 0x45
MOVLW 'v'
MOVWF 0x46
MOVLW 'i'
MOVWF 0x47
MOVLW 'o'
MOVWF 0x48
MOVLW ' '
MOVWF 0x49
MOVLW 'd'
MOVWF 0x4A
MOVLW 'e'
MOVWF 0x4B
MOVLW ' '
MOVWF 0x4C
MOVLW 'D'
MOVWF 0x4D
MOVLW 'a'
MOVWF 0x4E
MOVLW 't'
MOVWF 0x4F
MOVLW 'o'
MOVWF 0x50
MOVLW 's'
MOVWF 0x51
MOVLW ' '
MOVWF 0x52
MOVLW 'P'
MOVWF 0x53
MOVLW 'e'
MOVWF 0x54
MOVLW 'r'
MOVWF 0x55
MOVLW 'f'
MOVWF 0x56
MOVLW 'e'
MOVWF 0x57
MOVLW 'c'
MOVWF 0x58
MOVLW 't'
MOVWF 0x59
MOVLW 'o'
MOVWF 0x5A
MOVLW '.'
MOVWF 0x5B
MOVLW '.'
MOVWF 0x5C
MOVLW '.'
MOVWF 0x5D
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x5E
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x5F
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x5F
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN

```

```

; Esta línea de código manda a escribir por el puerto serie la siguiente cadena
; "Datos Borrados de Memoria!"
LINEA_DATOS_BORRADOS

```

```

MOVLW 0Ah
MOVWF 0x40
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x41
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x42
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x43
MOVLW 'D'
MOVWF 0x44
MOVLW 'a'

```

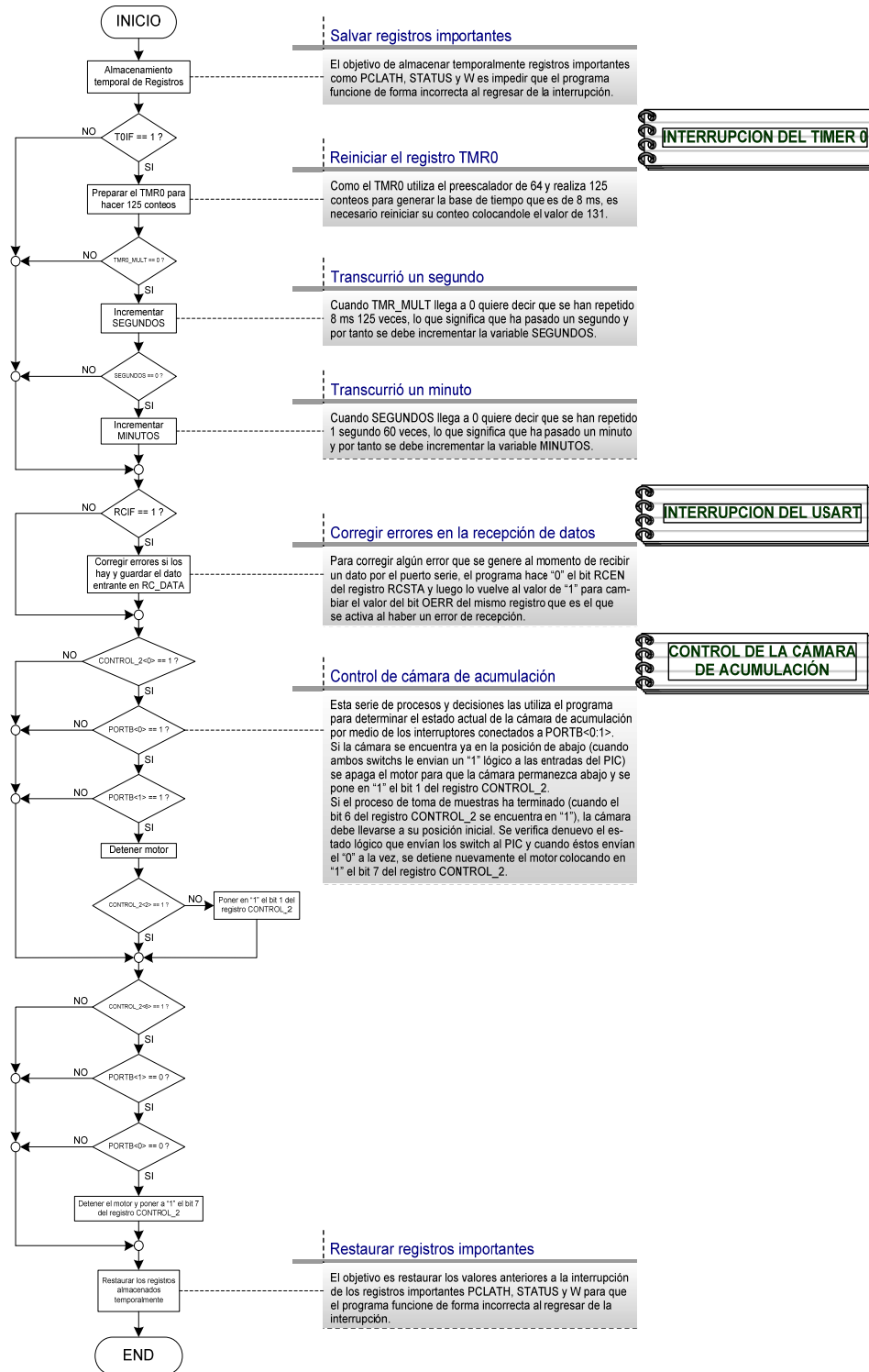
```
MOVWF 0x45
MOVLW 't'
MOVWF 0x46
MOVLW 'o'
MOVWF 0x47
MOVLW 's'
MOVWF 0x48
MOVLW ' '
MOVWF 0x49
MOVLW 'B'
MOVWF 0x4A
MOVLW 'o'
MOVWF 0x4B
MOVLW 'r'
MOVWF 0x4C
MOVLW 'r'
MOVWF 0x4D
MOVLW 'a'
MOVWF 0x4E
MOVLW 'd'
MOVWF 0x4F
MOVLW 'o'
MOVWF 0x50
MOVLW 's'
MOVWF 0x51
MOVLW ' '
MOVWF 0x52
MOVLW 'd'
MOVWF 0x53
MOVLW 'e'
MOVWF 0x54
MOVLW ' '
MOVWF 0x55
MOVLW 'M'
MOVWF 0x56
MOVLW 'e'
MOVWF 0x57
MOVLW 'm'
MOVWF 0x58
MOVLW 'o'
MOVWF 0x59
MOVLW 'r'
MOVWF 0x5A
MOVLW 'i'
MOVWF 0x5B
MOVLW 'a'
MOVWF 0x5C
MOVLW '!'
MOVWF 0x5D
MOVLW 0Ah
MOVWF 0x5E
MOVLW 0Dh
MOVWF 0x5F
MOVLW 0x40
MOVWF MEM_L
MOVLW 0x5F
MOVWF MEM_H
CALL ENVIAR_BLOQUE
RETURN
```

END

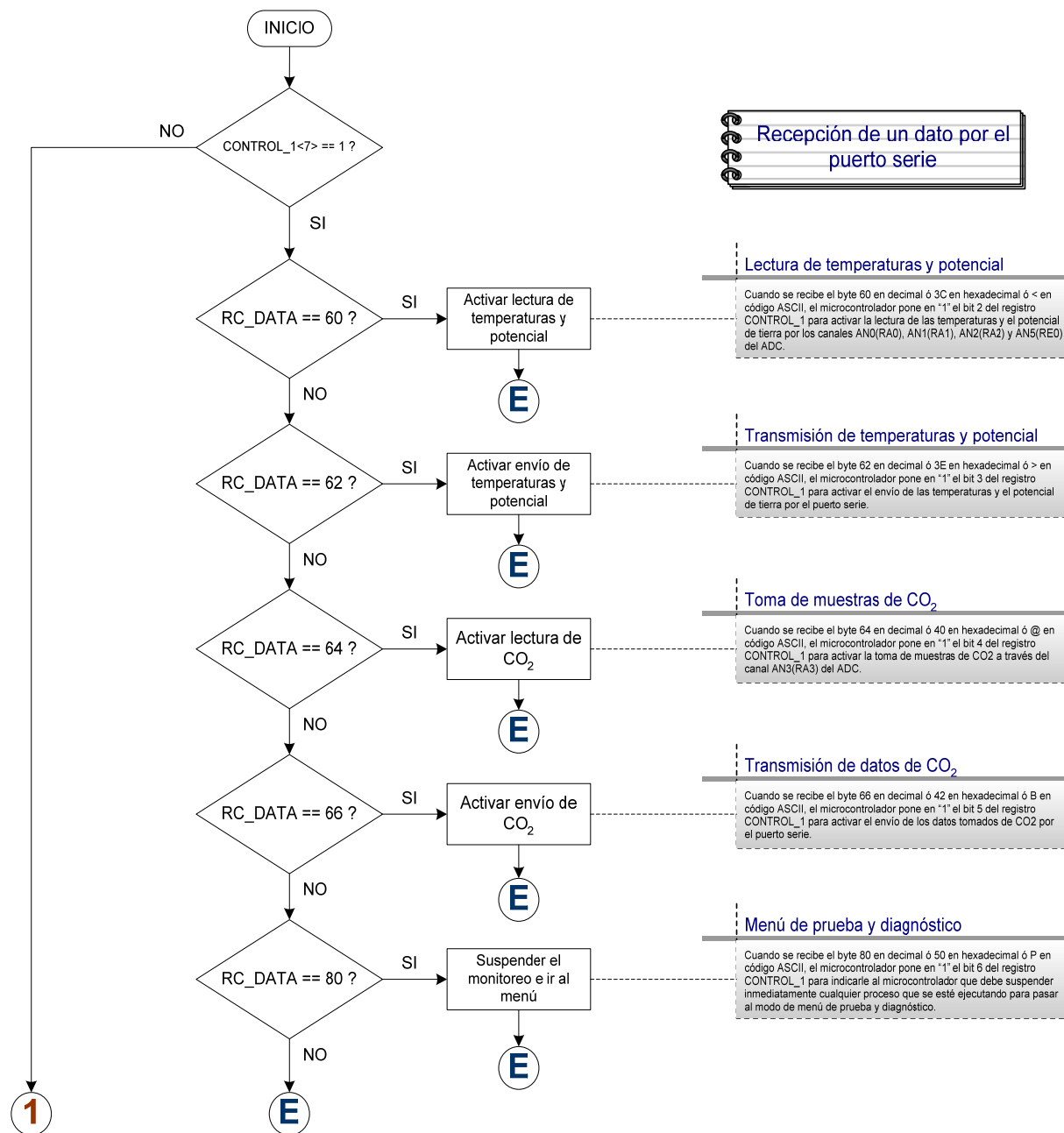
## APENDICE B

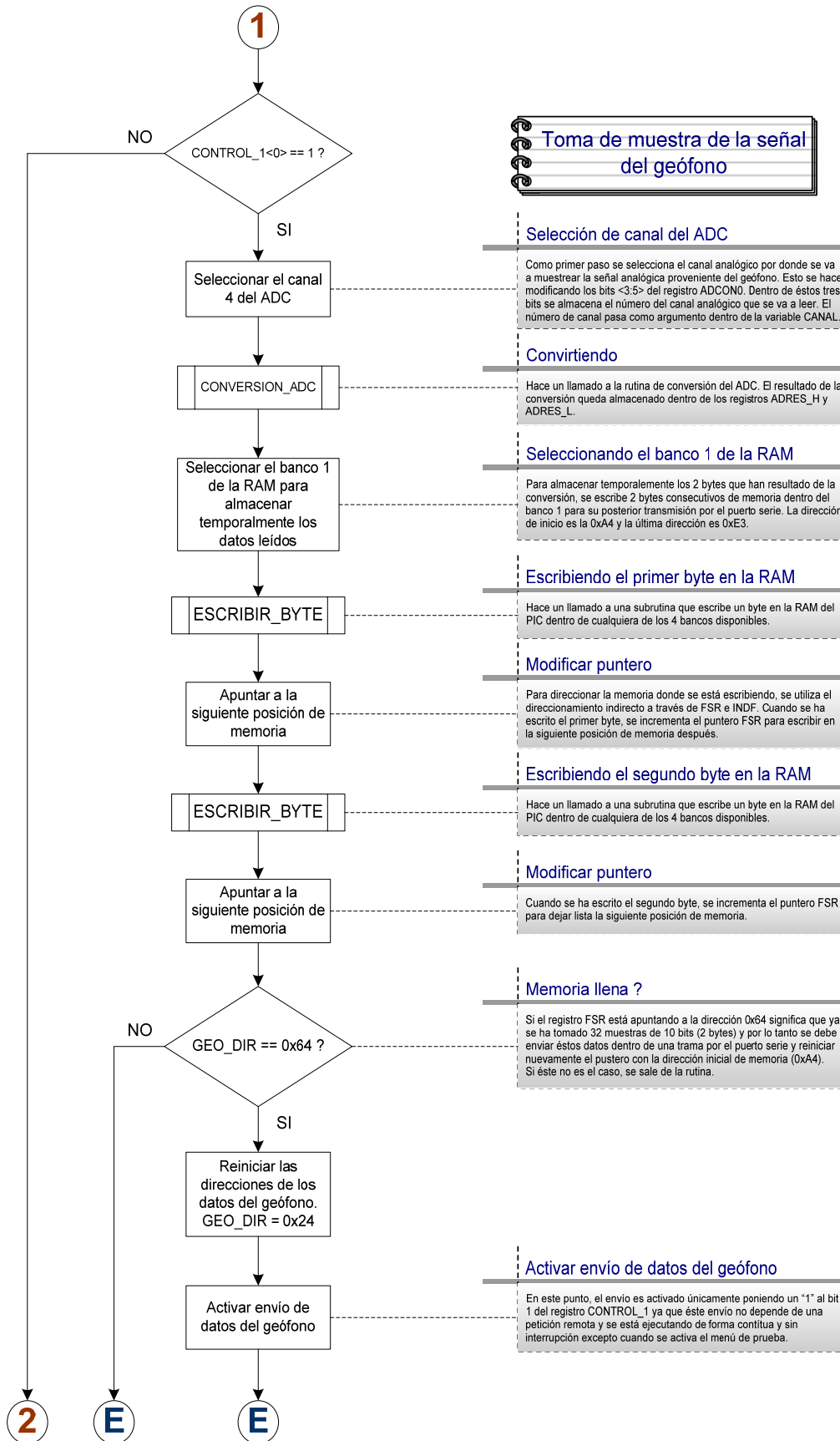
### FLUJOGRAMAS DE LOS PROCESOS Y SUBPROCESOS DEL PROGRAMA

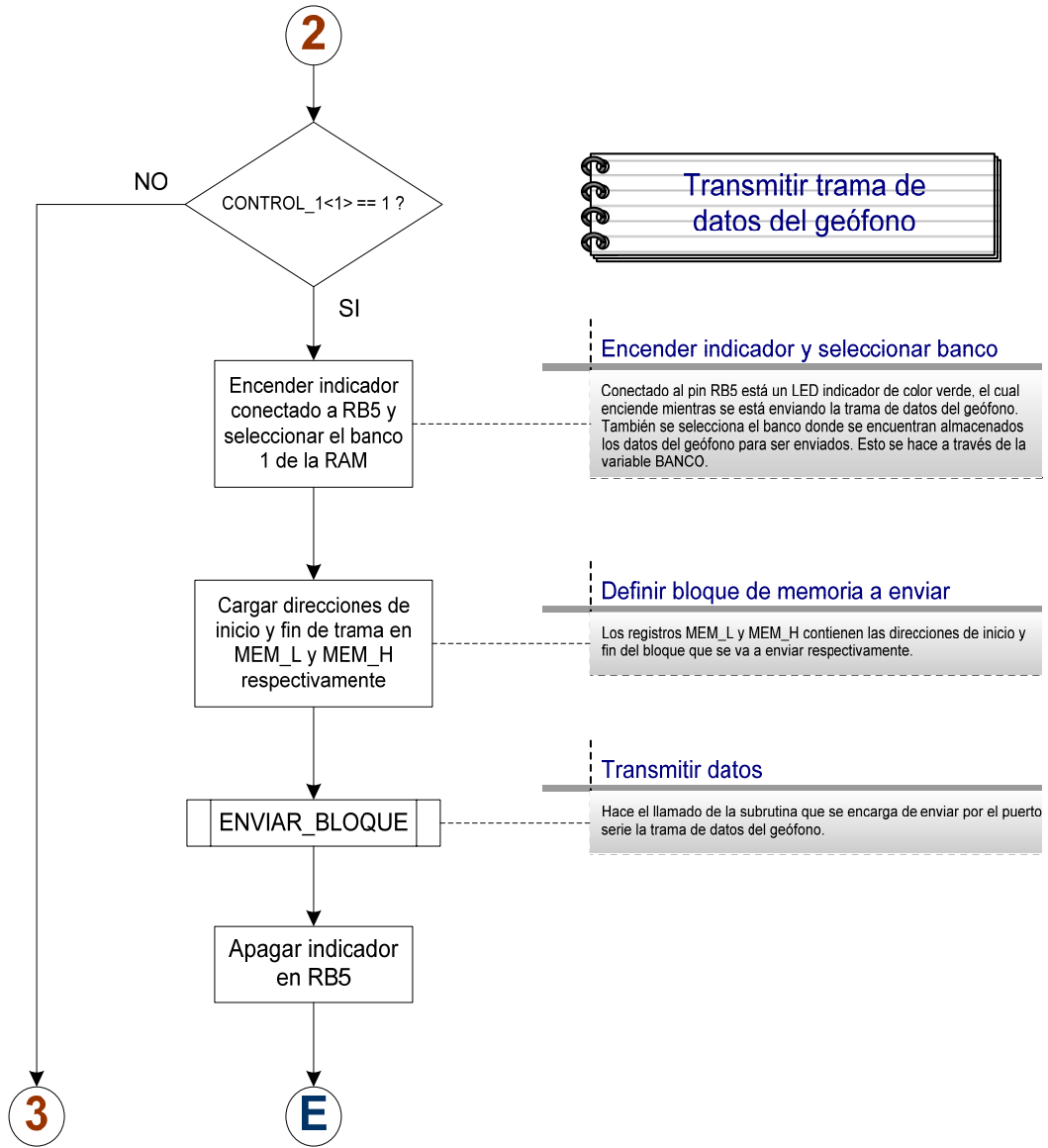
#### B.1 - VECTOR DE INTERRUPCIÓN

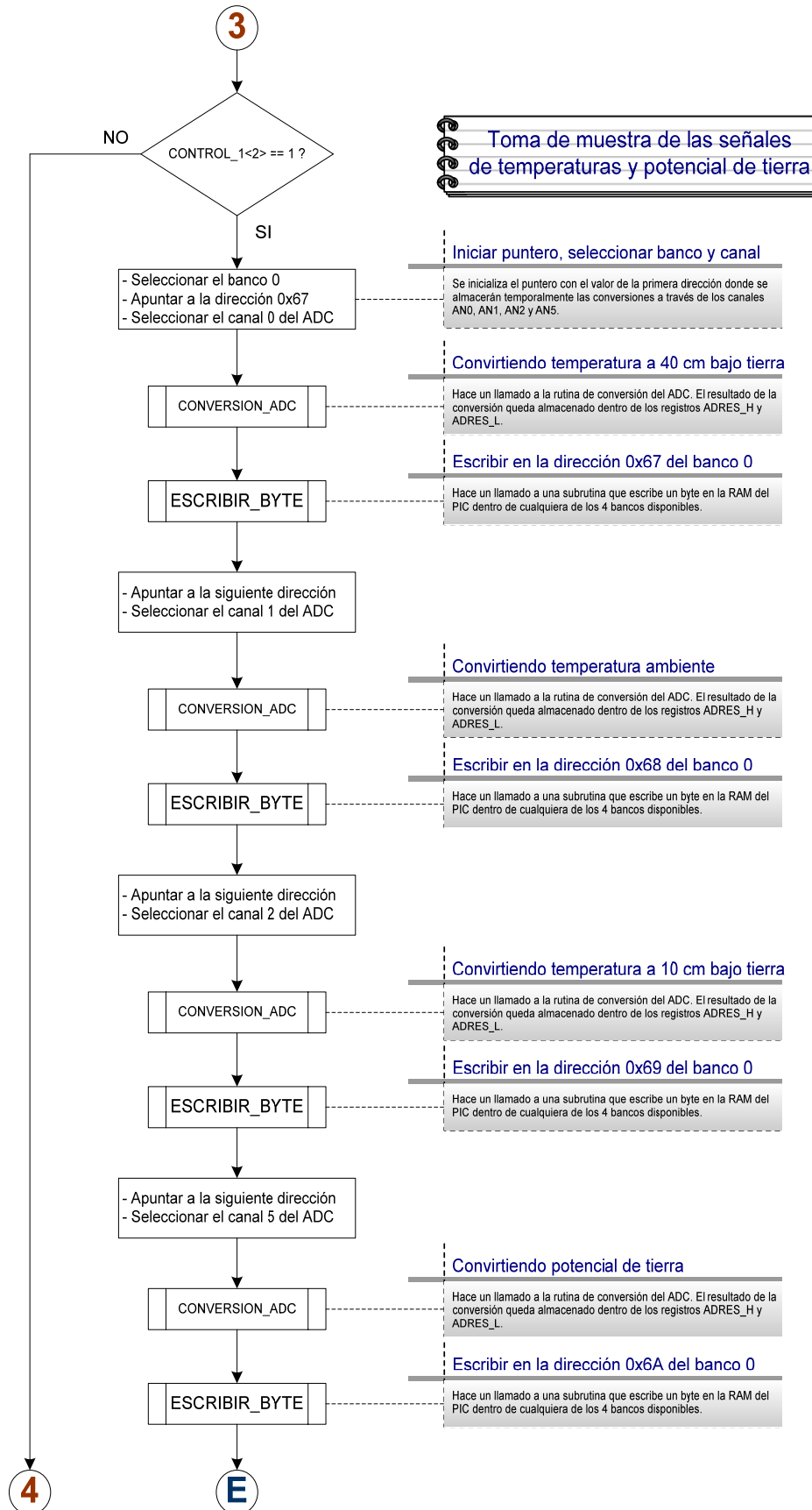


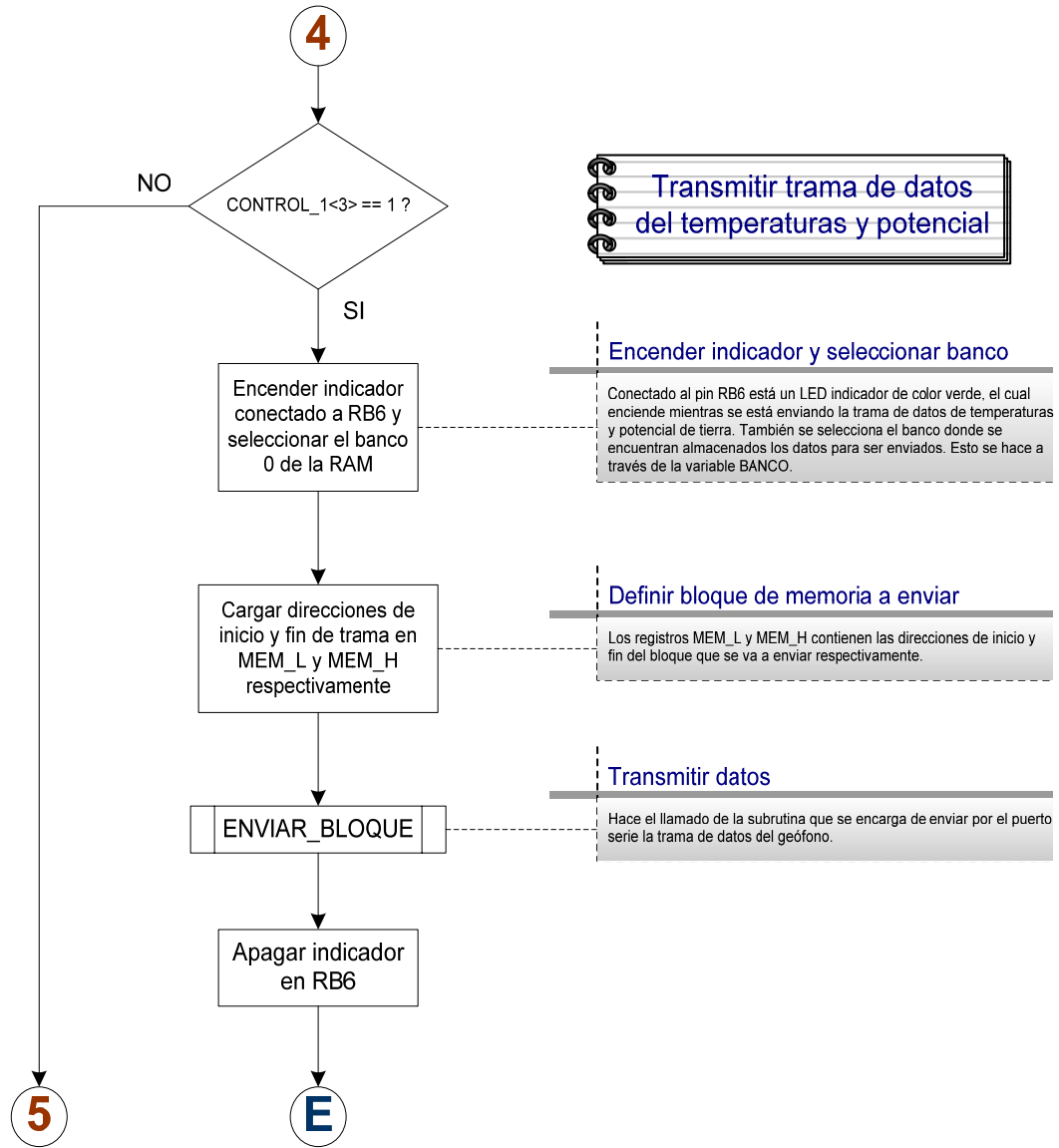
## B.2 - EVENTOS DEL REGISTRO CONTROL\_1



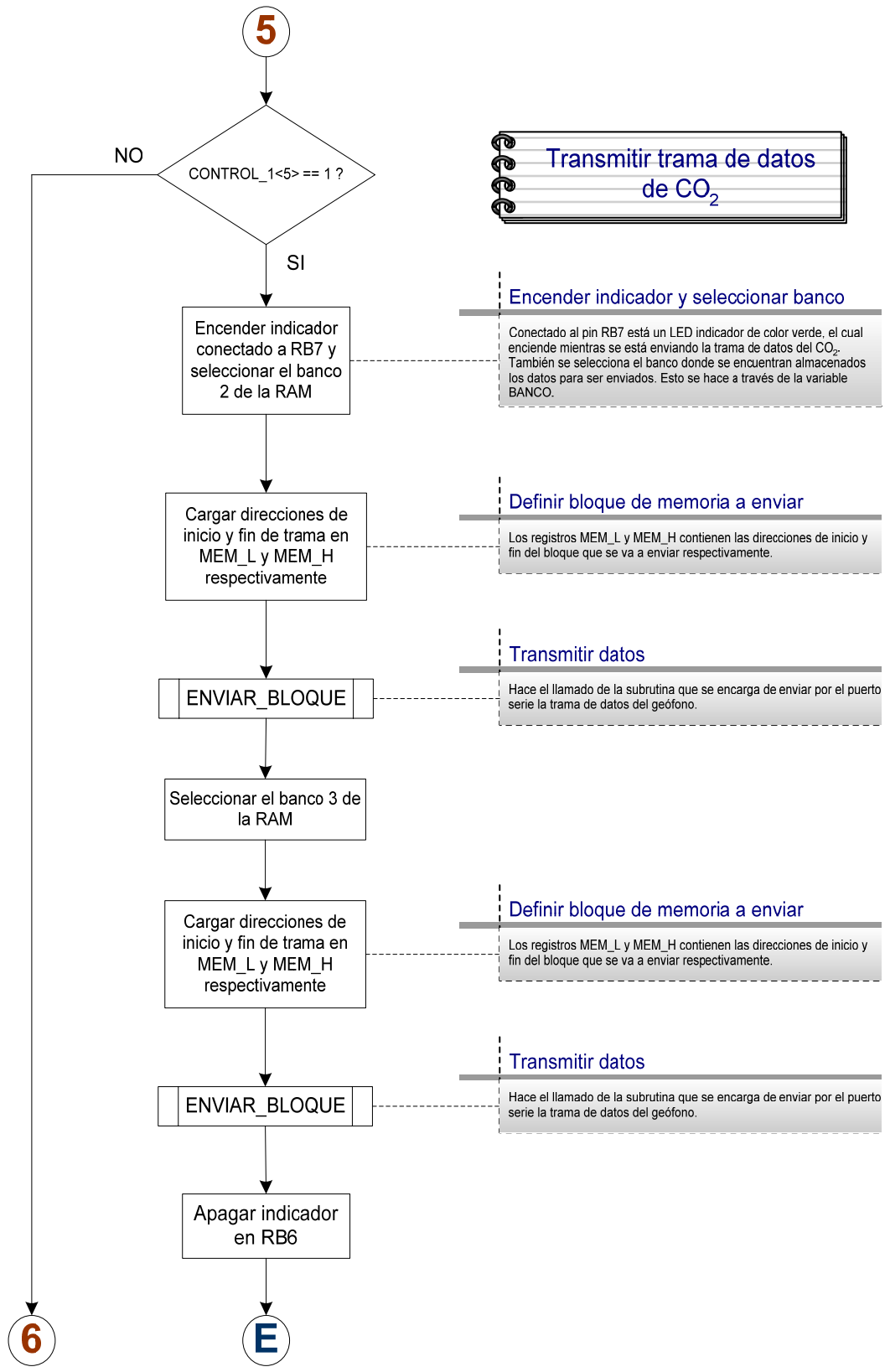


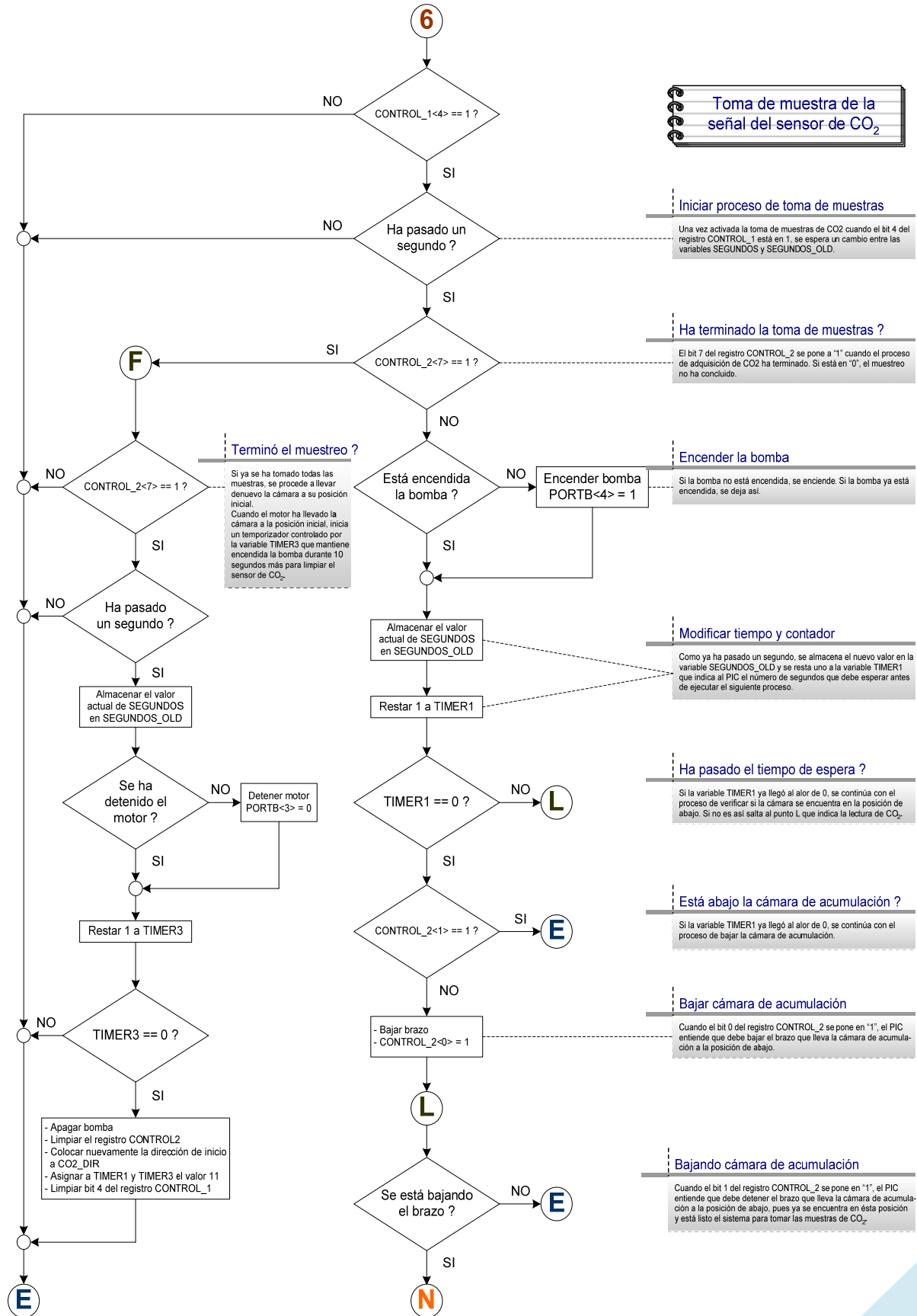












**Toma de muestra de la señal del sensor de CO<sub>2</sub>**

**Iniciar proceso de toma de muestras**

Una vez activada la toma de muestras de CO<sub>2</sub> cuando el bit 4 del registro CONTROL\_1 está en 1, se espera un cambio entre las variables SEGUNDOS y SEGUNDOS\_OLD.

**Ha terminado la toma de muestras ?**

El bit 7 del registro CONTROL\_2 se pone a "1" cuando el proceso de adquisición de CO<sub>2</sub> ha terminado. Si está en "0", el muestreo no ha concluido.

**Terminó el muestreo ?**

Si ya se ha tomado todas las muestras, se procede a llevar de nuevo la cámara a su posición inicial. Cuando el motor ha llevado la cámara a la posición inicial, inicia un temporizador controlado por la variable TIMER3 que mantiene encendida la bomba durante 10 segundos más para limpiar el sensor de CO<sub>2</sub>.

**Encender la bomba**

Si la bomba no está encendida, se enciende. Si la bomba ya está encendida, se deja así.

**Modificar tiempo y contador**

Como ya ha pasado un segundo, se almacena el nuevo valor en la variable SEGUNDOS\_OLD y se resta uno a la variable TIMER1 que indica al PIC el número de segundos que debe esperar antes de ejecutar el siguiente proceso.

**Ha pasado el tiempo de espera ?**

Si la variable TIMER1 ya llegó al valor de 0, se continúa con el proceso de verificar si la cámara se encuentra en la posición de abajo. Si no es así salta al punto L que indica la lectura de CO<sub>2</sub>.

**Está abajo la cámara de acumulación ?**

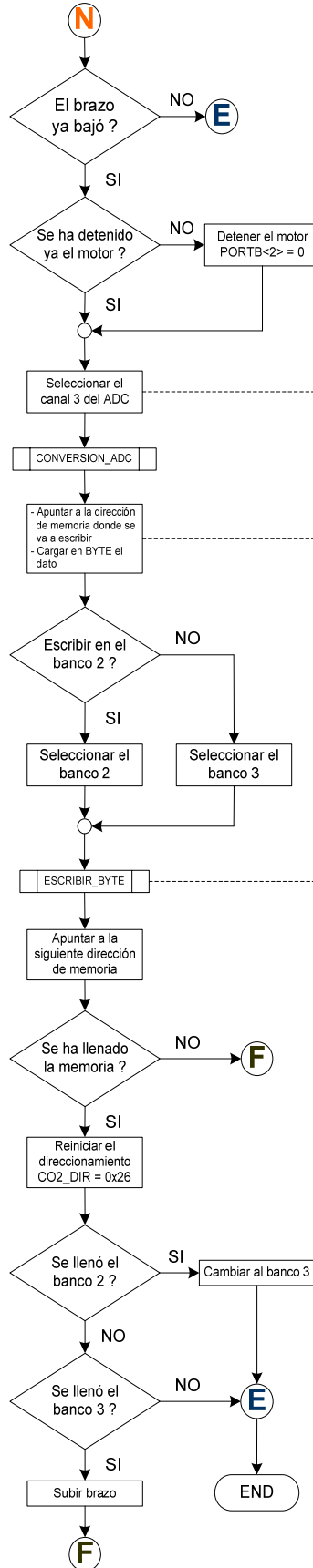
Si la variable TIMER1 ya llegó al valor de 0, se continúa con el proceso de bajar la cámara de acumulación.

**Bajar cámara de acumulación**

Cuando el bit 0 del registro CONTROL\_2 se pone en "1", el PIC entiende que debe bajar el brazo que lleva la cámara de acumulación a la posición de abajo.

**Bajando cámara de acumulación**

Cuando el bit 1 del registro CONTROL\_2 se pone en "1", el PIC entiende que debe detener el brazo que lleva la cámara de acumulación a la posición de abajo, pues ya se encuentra en esta posición y está listo el sistema para tomar las muestras de CO<sub>2</sub>.



### La cámara ya bajó ?

Cuando el bit 1 del registro CONTROL\_2 se pone en "1", el PIC entiende que la cámara de acumulación ha bajado.

### Detener el motor

Una vez que la cámara se encuentra lista para comenzar a tomar muestras, se detiene el motor haciendo "0" el bit 2 del puerto B.

### Seleccionar canal del ADC

Conectado al canal 3 del ADC (pin RA3) está la salida del sensor CO<sub>2</sub>, el cual envía un voltaje analógico entre 0 y 5 voltios al ADC interno del PIC.

### Apuntar a la dirección de memoria

Utilizando el direccionamiento indirecto, se carga dentro del registro FSR la dirección donde se va a escribir (la dirección inicial es la 0x26 para el banco 2 y 0xA6 para el banco 3) y dentro de la variable BYTE el dato a escribir.

### Seleccionar banco de la RAM

Como son 120 datos en total, separados en dos grupos de 60 bytes cada uno que se encuentran dentro de bancos de memoria distintos, se selecciona si el dato que se va a escribir debe ir dentro del banco 2 o dentro del banco 3.

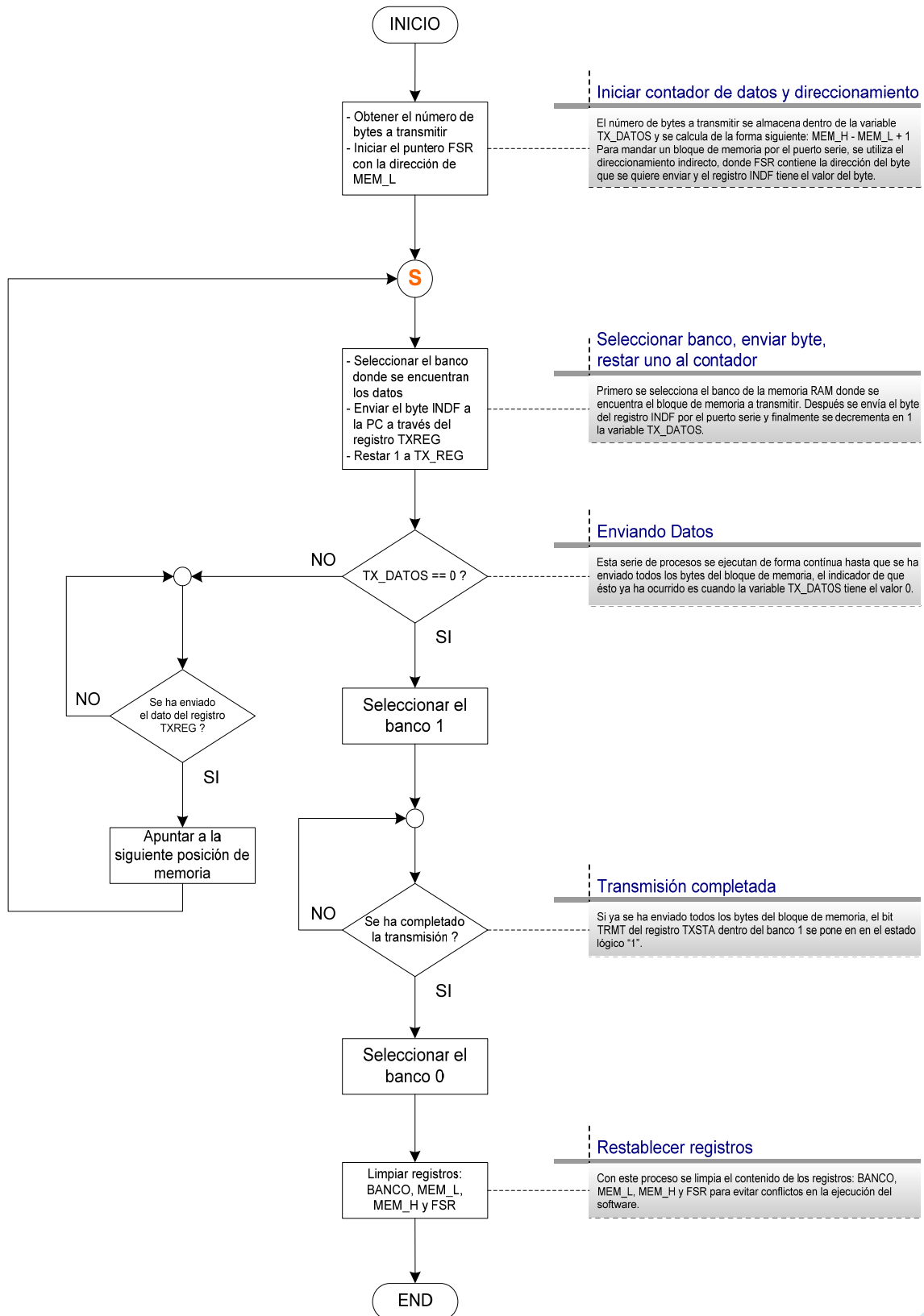
### Escribir un byte en la memoria

Hace un llamado a una subrutina que escribe un byte en la RAM del PIC dentro de cualquiera de los 4 bancos disponibles.

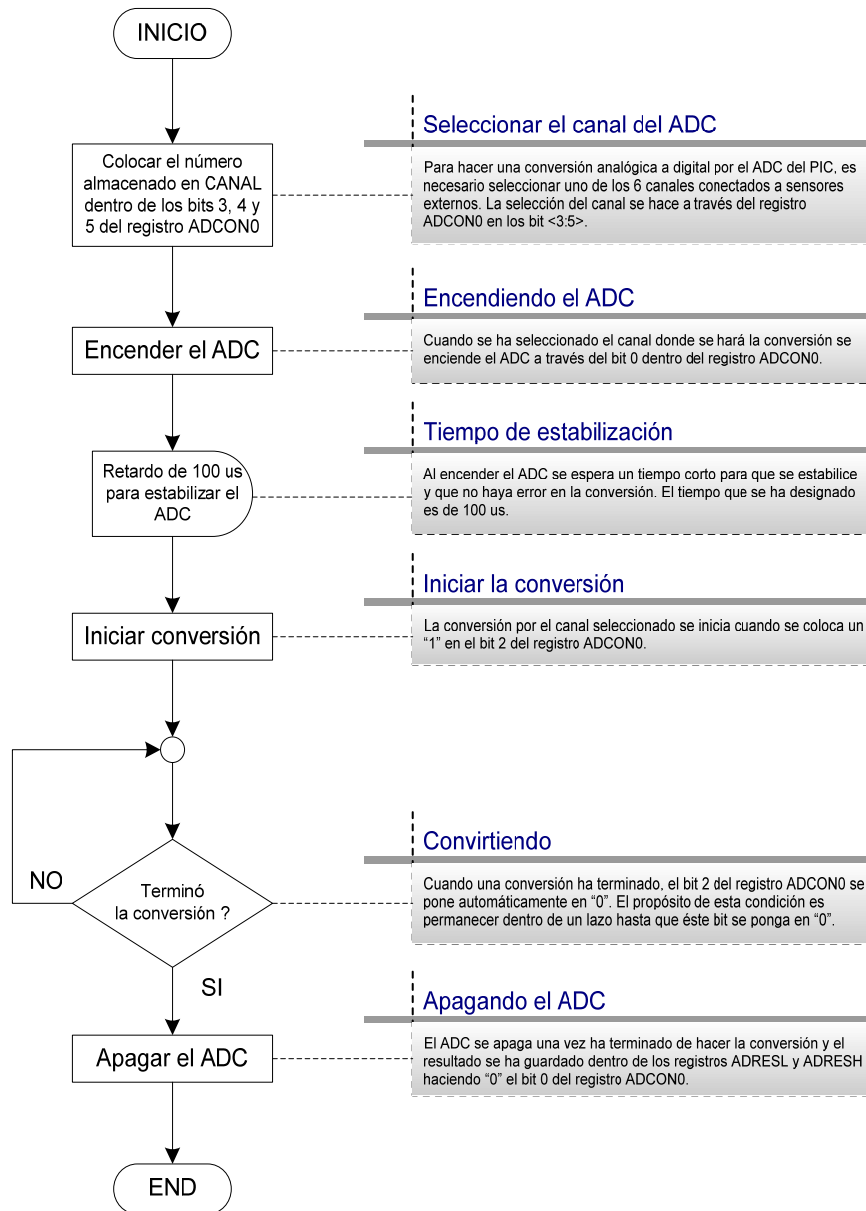
### Memoria llena ?

Si se ha direccionado ya 0x62 ó 0xE2 se debe reiniciar el direccionamiento y/o determinar si se han llenado los 120 bytes de memoria ó solamente 60 para cambiar de banco. Si aún no se ha llenado ninguno de los bancos de memoria, el programa hace un salto al punto F.

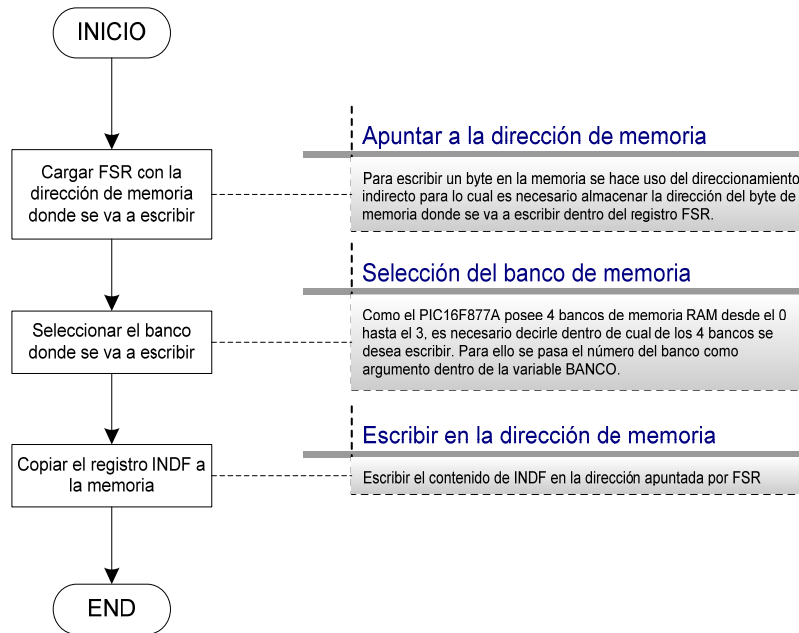
### B.3 - ENVIAR BLOQUE DE MEMORIA



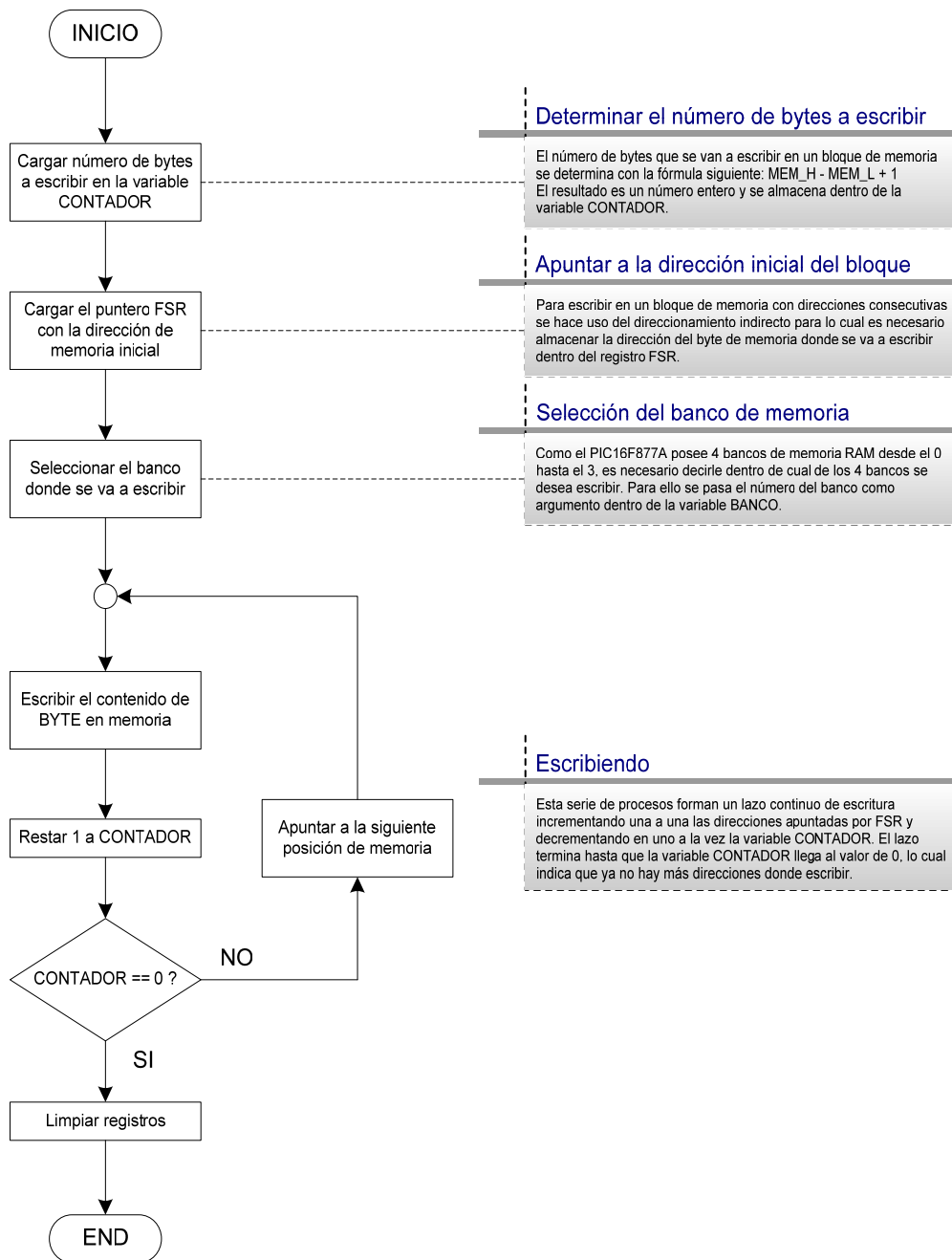
## B.4 - CONVERSIÓN ANALÓGICA DIGITAL



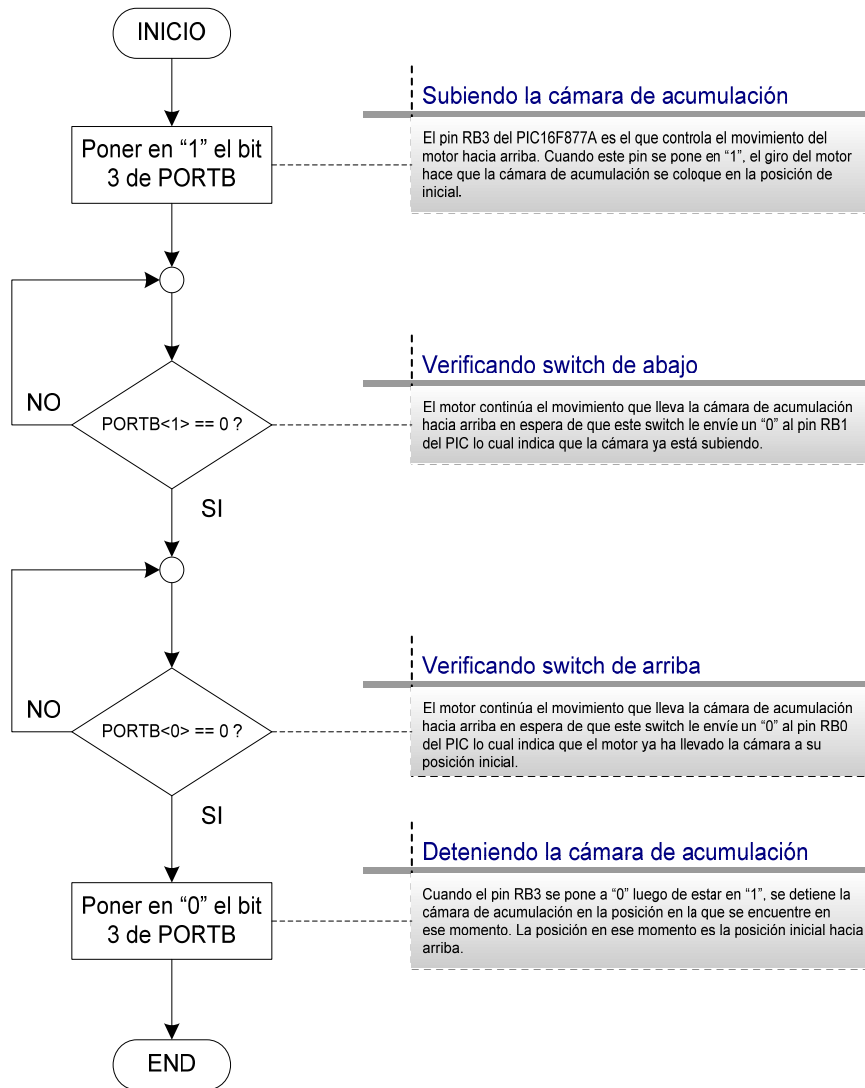
## B.5 - ESCRIBIR BYTE



## B.6 - ESCRIBIR BLOQUE

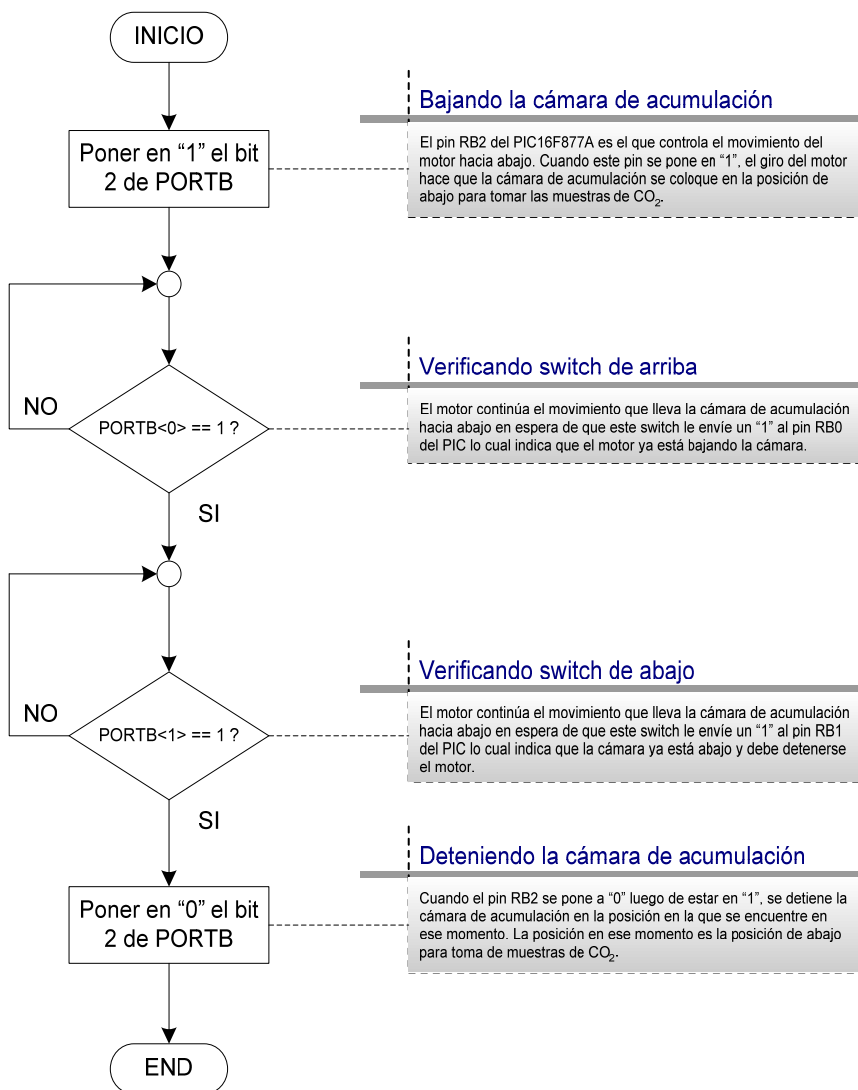


## B.7 - SUBIR BRAZO

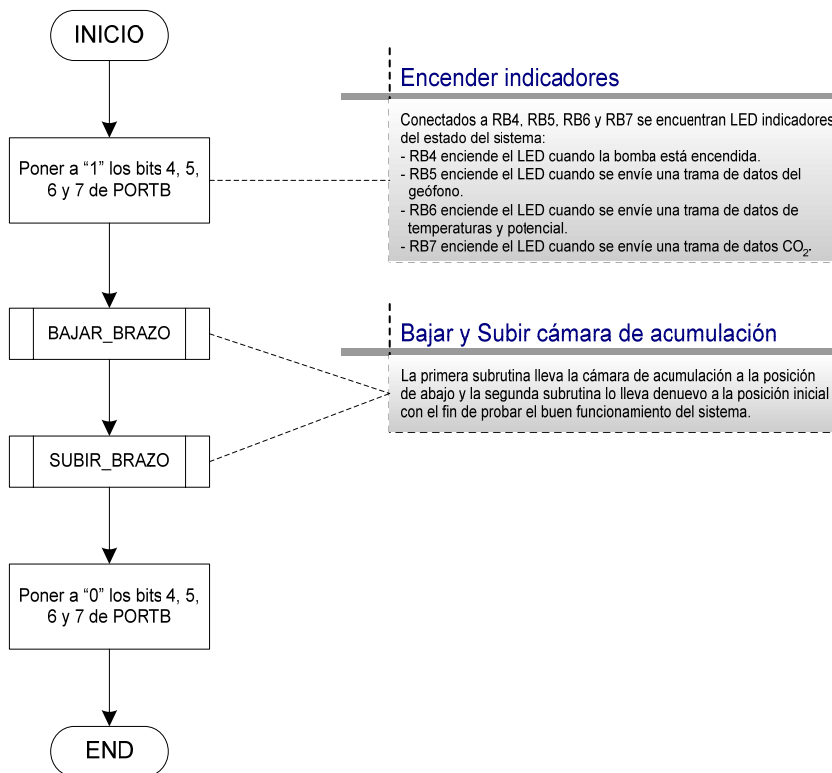




## B.8 - BAJAR BRAZO



## B.9 - PROBAR EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE CO<sub>2</sub>



## APENDICE C

### CONFIGURACION DEL ANALIZADOR LI-840

- a) Como primer paso, se debe instalar el software que proporciona el fabricante junto al analizador LI-840.
- b) Inicie la configuración, haciendo clic en el icono del programa del LI-840. Inmediatamente aparecerá la ventana mostrada en la figura C.1.

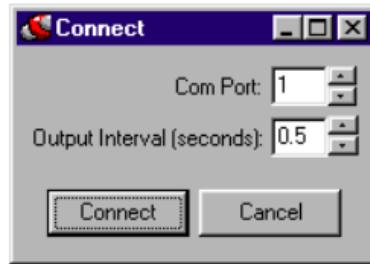


Figura C.1. Ventana de Inicio de Configuración del LI-840

- c) Seleccione el número de puerto serial al cual se conectó el LI-840 y los intervalos de tiempo en los cuales se desea que este dispositivo realice las mediciones. Luego haga clic en “Connect”.

Si el dispositivo se conectó apropiadamente, el programa mostrará las mediciones del LI-840 como se muestra en la figura C.2.

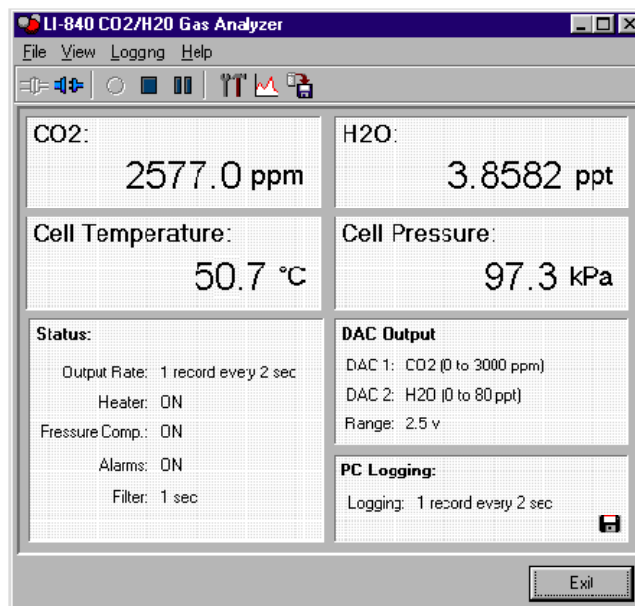


Figura C.2. Ventana que muestra los datos medidos por el Analizador de CO<sub>2</sub>

- d) Para reconfigurar este dispositivo se selecciona la opción “Propiedades” en la barra de herramientas que se muestra en la figura C.3. Inmediatamente se muestra la ventana de propiedades de la figura C.4.

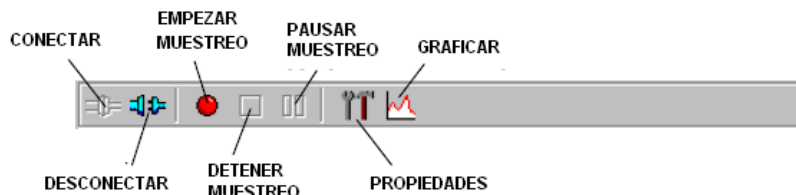


Figura C.3. Barra de Herramientas del Programa de Configuración

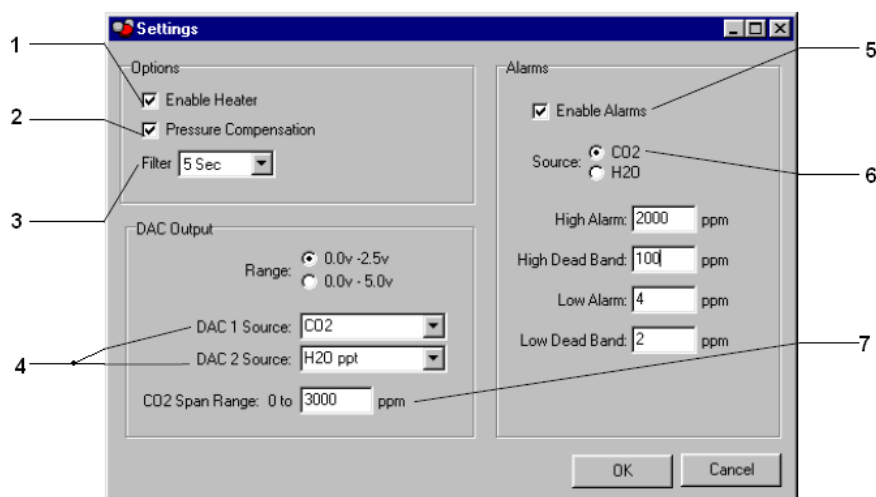


Figura C.4. Ventana de Configuración del Analizador de CO<sub>2</sub>

- 1- Esta opción debe habilitarse para mantener el banco óptico a una temperatura de 50 °C.
- 2- Esta opción debe habilitarse para compensar los cambios de densidad del gas por variaciones en la presión.
- 3- Opción de filtrado para la señal.
- 4- Selección del tipo de señal de salida de los DAC.
- 5- Esta opción permite activar o desactivar la alarma ajustando los valores mínimos y máximos y los valores de la banda muerta.
- 6- Selección de la fuente para la alarma
- 7- Rango de medición de CO<sub>2</sub>. Este rango para el LI-840 es de 0 a 3000 ppm.

- e) Para la estación de monitoreo multiparametrica, la configuración necesaria es la siguiente:

*Enable Heater* → *Habilitado*  
*Pressure Compesation* → *Habilitado*  
*Enable Alarms* → *Deshabilitado*  
*CO2 Span Range* → *0 – 2000 ppm*  
*DAC Output Range* → *0.0v – 5.0v*  
*DAC1 Source* → *CO2*

Con lo anterior se obtiene una salida analógica entre 0 a 5V con un rango de medición de 0 hasta 2000 ppm.

## APENDICE D

### CREACION Y CONFIGURACION DEL PUERTO SERIAL VIRTUAL

Para crear y configurar un puerto serial virtual se usa el software **Trueport versión 6.01**. Cabe mencionar que esta versión fue descargada de la página oficial del fabricante por presentar mayor facilidad de uso y de configuración de un puerto virtual que la versión proporcionada en conjunto con el convertidor.

1. Luego de instalar el software, haga clic en el icono para desplegar la pantalla principal mostrada en la figura D.1.

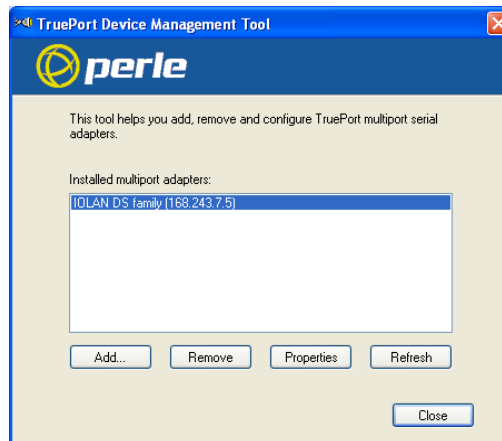


Figura D.1. *Pantalla inicial para la creación del puerto serial virtual*

2. Seleccione el convertidor y haga clic en “Propiedades”. Inmediatamente se mostrará la ventana de la figura D.2.

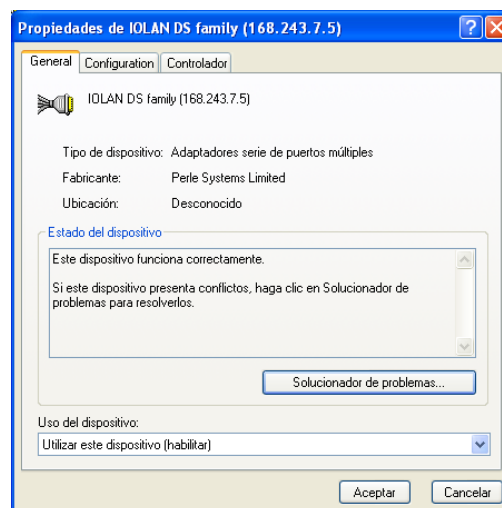


Figura D.2. *Ventana de propiedades del puerto serial virtual*

3. Seleccione la opción “Configuración” en donde podrá observar el número de puertos seriales virtuales creados anteriormente y la dirección IP del convertidor. En la figura D.3, se muestra la configuración establecida luego de haber creado el puerto virtual usado durante las pruebas. A la vez, esta ventana presenta la opción de configurar el convertidor IOLAN DS1 a través de Telnet o Internet.

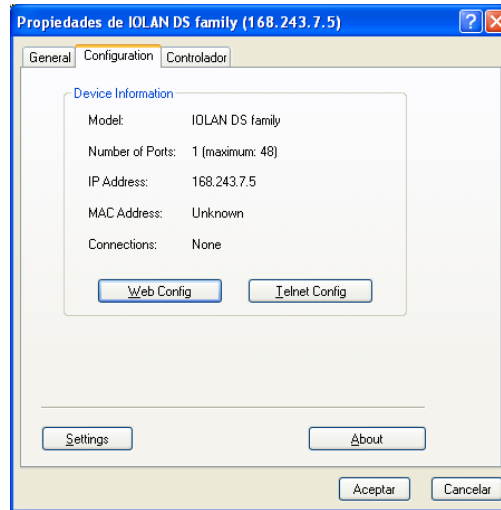


Figura D.3. Ventana de creación y configuración de un puerto serial virtual

4. Haga clic en “Settings” para ver o modificar las propiedades del puerto virtual creado. La ventana de la figura D.4 aparecerá indicando el total de puertos virtuales creados hasta ese momento. Para este caso, se ha creado un puerto virtual COM5

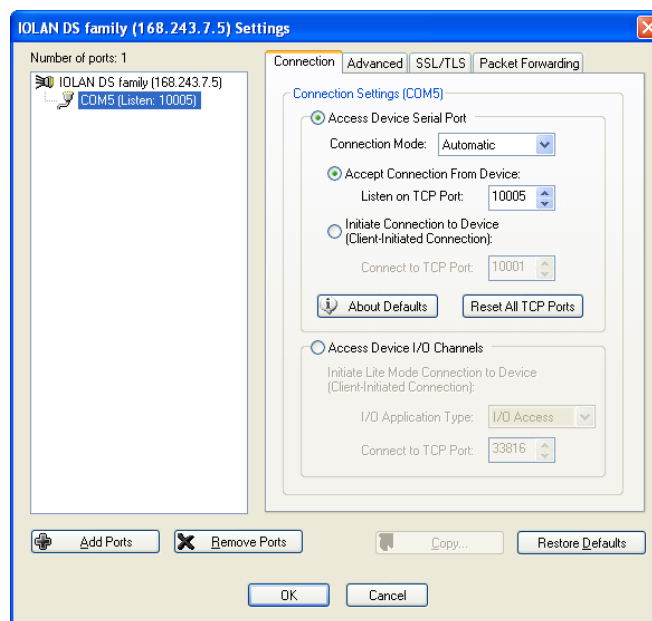


Figura D.4. Ventana de propiedades de los puertos virtuales creados

A la derecha de esta ventana se muestra las propiedades de los puertos creados. Para esta aplicación solo la opción “Conexión” es de interés. En ésta se debe seleccionar el modo de conexión y el número de puerto el cual deberá coincidir con el número preestablecido en la configuración del convertidor serial a ethernet.

5. Para crear un nuevo puerto virtual, se selecciona la opción “Add Ports” desplegando la ventana mostrada en la figura D.5. En ésta se debe elegir el total de puertos a crear y el número con el cual se iniciará.

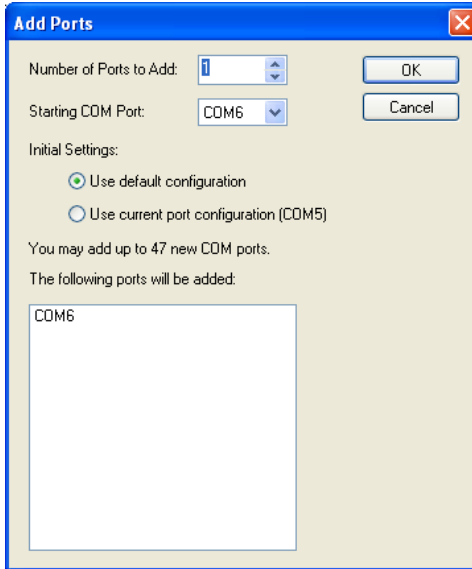


Figura D.5. Creación de puertos seriales virtuales

6. Para eliminar un puerto virtual creado, se selecciona la opción “Remove Ports” mostrando la ventana de la figura D.6. Aquí se selecciona los puertos que se desean eliminar.

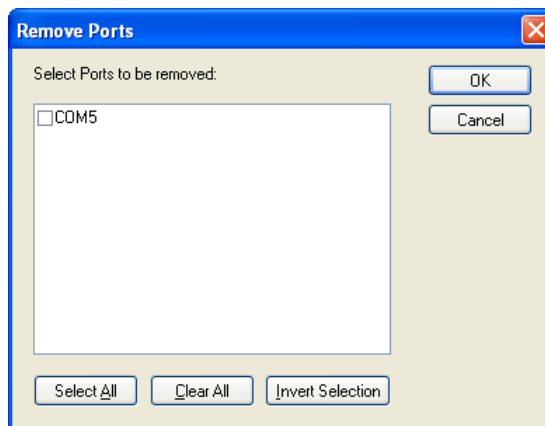


Figura D.6. Eliminación de puertos virtuales



## APENDICE E

### MANUAL BASICO PARA EL USUARIO

En este apéndice, se describe los pasos a seguir para activar la medición de los parámetros vulcanológicos a través de LabView. Es importante mencionar que antes de ejecutar el programa diseñado, se debe haber instalado previamente LabView 7.1 y copiado a una carpeta específica el programa principal, las SubVIs y el archivo en Excel.

1. Al hacer clic sobre el programa principal “Sistema de Monitoreo Vulcanologico.vi” aparecerá el panel frontal de la figura E.1.

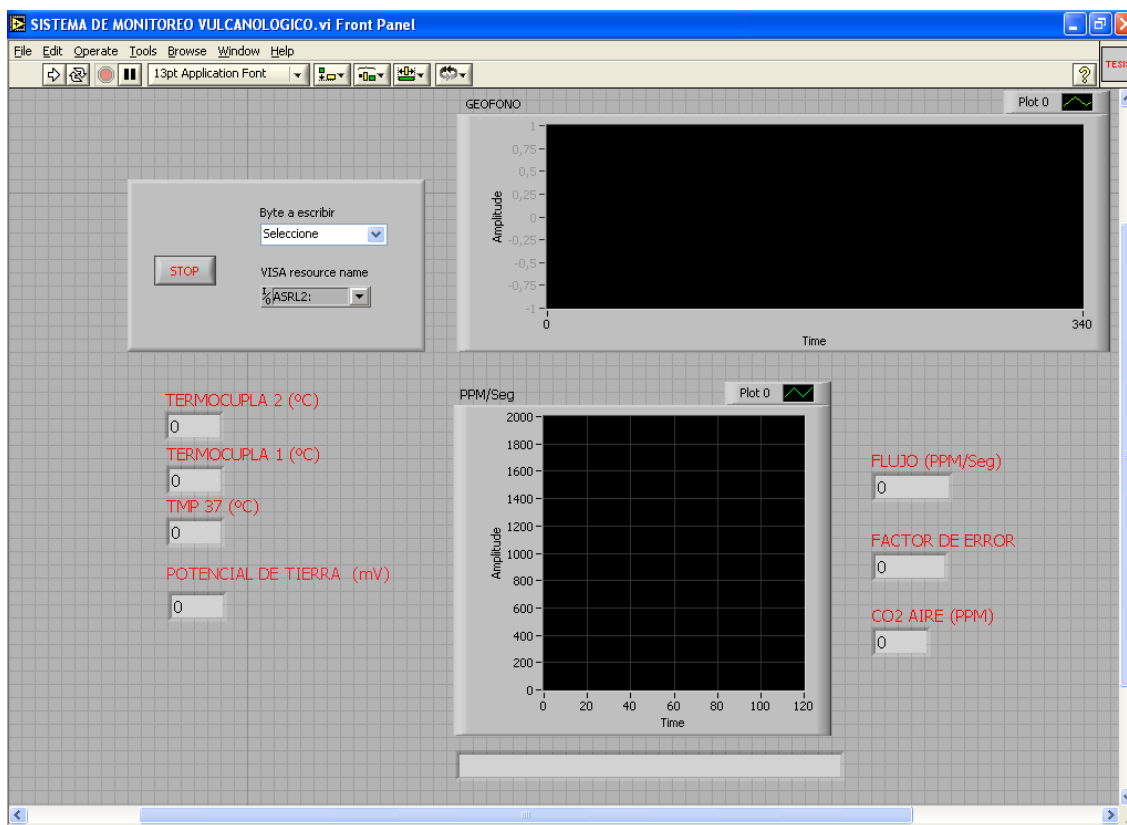


Figura E.1. *Panel Frontal del Programa en LabView*

2. Antes de ejecutar el programa, es necesario modificar la dirección del archivo Excel por la nueva dirección en la cual se guardará. Esto se realiza en el diagrama de bloques del programa como se muestra en la figura E.2.

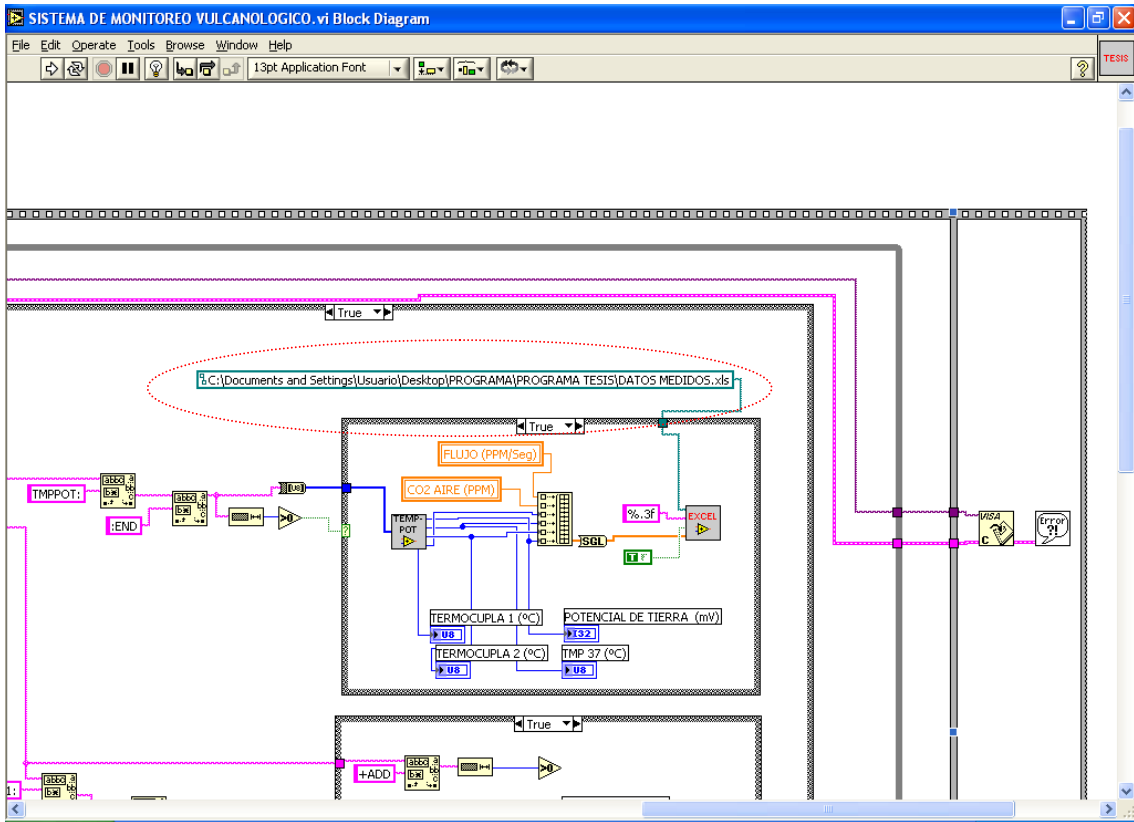


Figura E.2. Diagrama de bloques que muestra el punto de modificación de la dirección del archivo Excel

3. Seleccione el puerto virtual con el cual se conectará el programa en la opción “VISA resource name” como se muestra en la figura E.3.

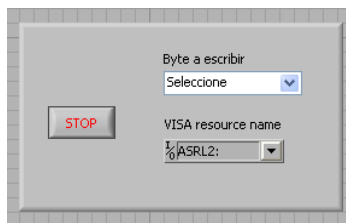


Figura E.3. Ventana de selección del puerto virtual

4. Haga clic en el botón de “Correr programa” que se muestra en la figura E.4

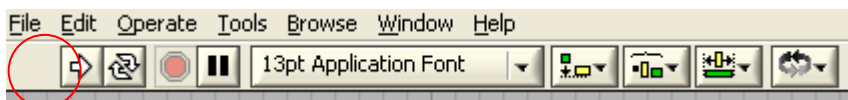


Figura E.4. Botón para hincar el programa de medición.

## APENDICE F

### CONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR IOLAN DS1

Existen diversos métodos de configuración del convertidor serial a ethernet de los cuales en esta sección se explicará uno de los métodos más comunes y sencillos que es a través del **Device Manager versión 3.105**. Este programa se proporciona en conjunto con el dispositivo y es de fácil instalación. En caso de necesitar una versión más actualizada se puede descargar de la página oficial del IOLAN [www.perle.com](http://www.perle.com)

1. Conecte el convertidor a la computadora e instale el software.
2. Haga clic en el icono para abrir el Device Manager. Seleccione la opción “Manage Device Server” tal como se muestra en la figura F.1.

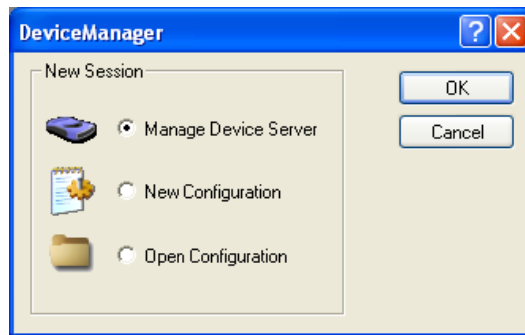


Figura F.1. *Ventana de selección inicial del Device Manager.*

3. Haga clic en “Search Local Network” para localizar al convertidor. Podrá observar que el software comienza la búsqueda del convertidor y al momento de encontrarlo, presenta el convertidor conectado en ese momento a la computadora como se muestra en la figura F.2. Seleccione el convertidor y haga clic en “Ok” para poder ingresar a éste.

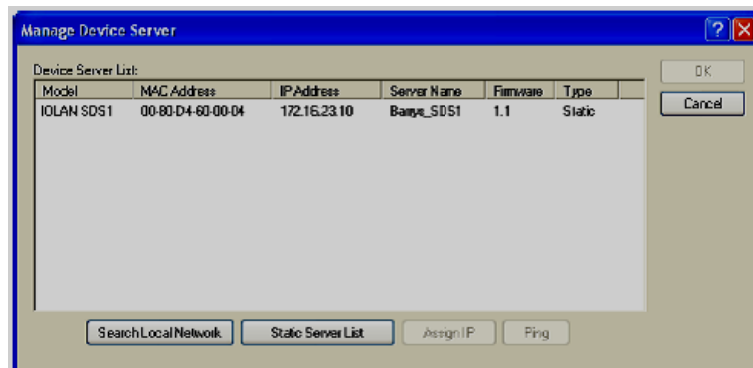


Figura F.2. *Ventana que muestra la lista de los dispositivos conectados a la computadora*

4. Seleccione de “Server Configuration” la opción “Server”. Inmediatamente se desplegará la pantalla de la figura F.3. En ésta, el usuario puede modificar el nombre del servidor y la dirección IP, datos que son los únicos de interés para esta aplicación. En el campo “Subnet/Prefix Bits” se coloca 16 por el tipo de máscara de subred utilizada (255.255.0.0).

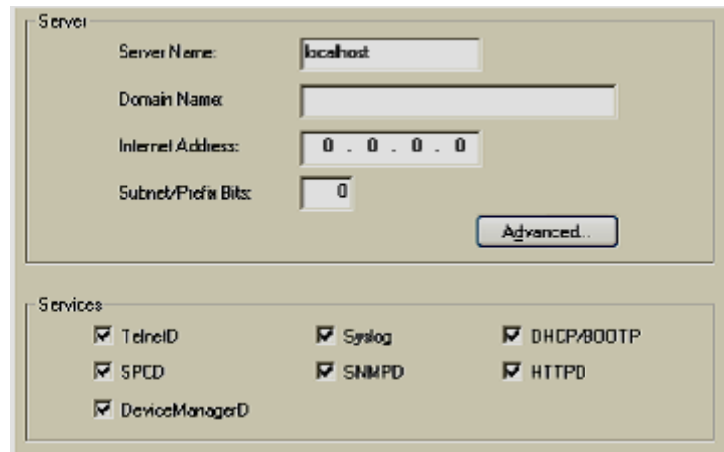


Figura F.3. Opción “Server” que permite configurar la dirección IP y el nombre del servidor

5. En la opción “Configuring TruePort Baud” de la figura F.4, se debe seleccionar la velocidad de comunicación entre la computadora y el convertidor. En caso de desconocer este dato, se selecciona “Auto”, opción que detecta automáticamente la velocidad de comunicación.

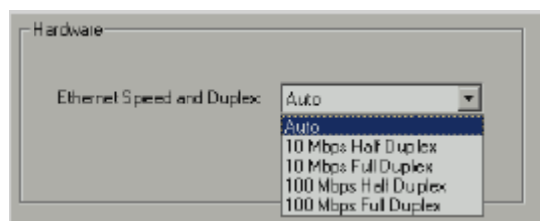


Figura F.4. Ventana de selección de la velocidad de comunicación

6. En la opción “Configuring Lines” (figura F.5), se debe configurar los parámetros de comunicación del puerto serial y seleccionar el servicio a utilizar. Para una comunicación directa entre el convertidor y la computadora, se recomienda elegir el servicio “Silraw” y en la opción “Service Settings”, indicar el numero de puerto virtual el cual deberá ser similar al explicado en el apéndice D. Luego de configurar estos parámetros se debe hacer clic en la opción “Apply” para guardar los cambios realizados.

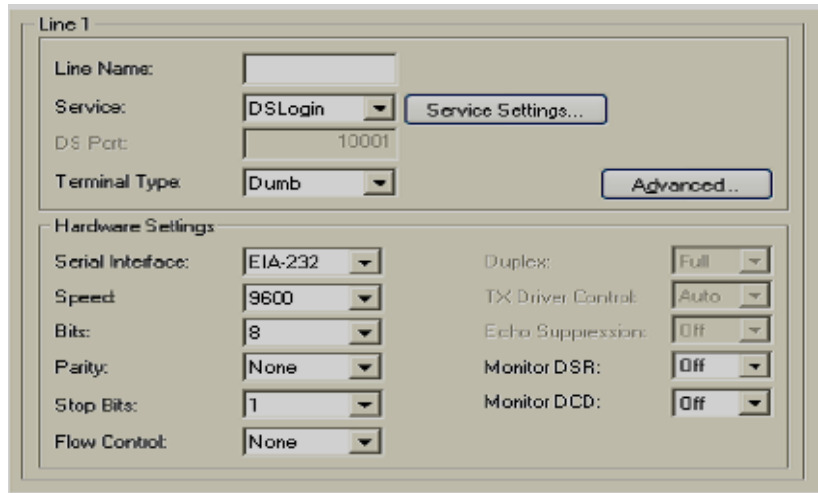


Figura F.5. Opción “Configuring Lines” que permite configurar el puerto serial y el servicio a utilizar.

Finalmente, para que todos los cambios generados a través del Device Manager sean efectivos, en la barra de herramientas se debe seleccionar la opción “Tools”, “Download Configuration to Unit” y luego “Reboot Server” con la finalidad de trasladar los cambios al convertidor y que el dispositivo sea reiniciado.

Cabe mencionar que las otras opciones presentadas en el Device Manager no son necesarias modificar debido a la función general que esta realizando el convertidor serial a ethernet.

## APENDICE G

### CONFIGURACIÓN DEL ACCESS POINT LINKSYS

Antes de iniciar la configuración del Access Point, el usuario debe conectar el dispositivo a la computadora e insertar el CD que contiene el software de configuración proporcionado por el fabricante.

1. Al momento de correr el programa de configuración, aparecerá la pantalla mostrada en la figura G.1. Seleccione la opción “Setup”



Figura G.1. Pantalla inicial de configuración del Access Point

2. La siguiente pantalla que aparece, mostrada en la figura G.2, presenta una lista de Access Points conectados a la red, junto a la información del estado de cada dispositivo. Seleccione el dispositivo a configurar.



Figura G.2. Ventana de selección del dispositivo a configurar

3. En la ventana de la figura G.3 se debe ingresar la clave del equipo. Para este caso, la clave usada es **admin**.



Figura G.3. Ventana de ingreso de la clave del dispositivo

4. Inmediatamente aparecerá la primera ventana de configuración del Access Point (figura G.4). En ésta, podrá modificar el nombre del AP, la dirección IP y la máscara de Subred.



Figura G.4. Primera Ventana de configuración del Access Point

5. La segunda ventana de configuración, mostrada en la figura G.5, permite ingresar el SSID y el número de canal en el cual se comunicará con los otros dispositivos.

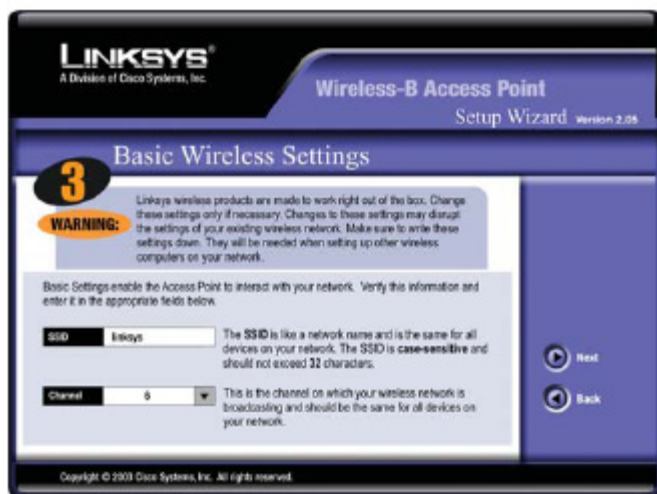


Figura G.5. Segunda Ventana de configuración del Access Point

6. A continuación se presenta la opción de Seguridad en el cual el usuario puede encriptar el dispositivo como se muestra en la figura G.6. Para el propósito de este trabajo, esta opción queda deshabilita.

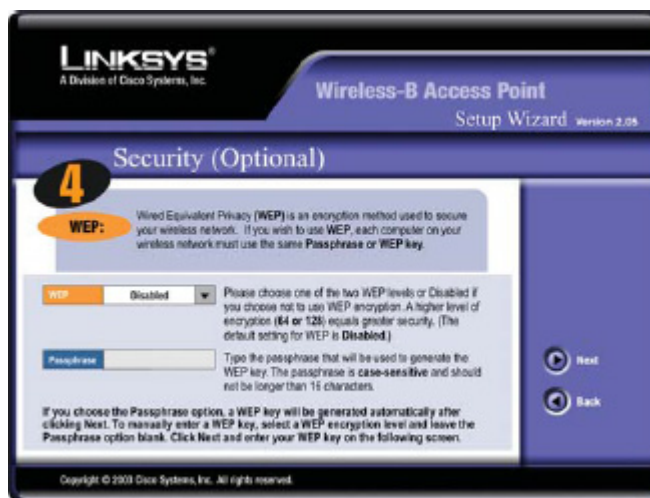


Figura G.6. Ventana opcional que permite encriptar el Access Point



7. Finalmente, se muestra la ventana que permite al usuario confirmar todos los cambios realizados (figura G.7).



Figura G.7. Ventana de confirmación de los cambios realizados

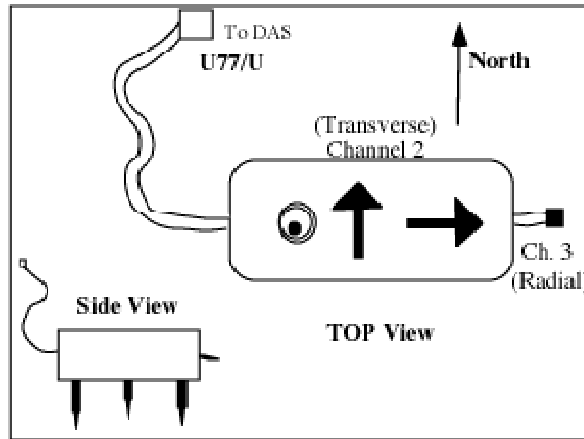
Elemento	Especificación	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Termocupla	Tipo K	2	15	30
Sensor de temperatura	TMP37	1	2,5	2,5
Geófono	Mark L28	1	50	50
Electrodos de cobre		3	5	15
Analizador de CO2	LI840	1	5000	5000
AD595		2	3	6
Amplificador operacional	AD623	4	2,6	10,4
Microcontrolador	PIC16F877A / 40 pines	1	15	15
Motor DC	12V / 0,8A	1	5	5
Bomba de succión		1	75	75
Relay de 2 contactos	12 V DC	2	1,5	3
Relay de 1 Contacto	12 V DC	1	1,3	1,3
Diodo	1N4004	3	0,25	0,75
Regulador de voltaje	LM7805 (3A)	2	1,5	3
Transistor	2N2222	3	0,6	1,8
Resistencia	1 k $\Omega$ / ¼ W	2	0,12	0,24
Resistencia	5,4 k $\Omega$ / ¼ W	1	0,12	0,12
Resistencia	6,8 k $\Omega$ / ¼ W	3	0,12	0,36
Resistencia	100 k $\Omega$ / ¼ W	2	0,12	0,24
Capacitor	10 $\mu$ F / 16 V	2	0,2	0,4
Access Point Linksys	Wireless-B	1	40	40
Access Point Orinoco	AP 2000 AE	1	60	60
Antena parabólica	24 dBi	2	160	320
Amplificador Wi-Fi	1W	2	100	200
Convertidor RS232/Eth Perle	IOLAN DS1	1	240	240
Caja metálica de para circuito	14 x 45 x 40 cm	1	40	40
Caja metálica de para estación	14 x 30 x 30 cm	1	45	45
Cable coaxial	RG-8 / mts	3	1,75	5,25
Cable UTP		15	0,5	7,5
Mangueras plásticas	4 mm de diámetro interno, 1 mm de espesor / mts	5	0,15	0,75
Cable duplex	Forrado bicolor rojo/negro (en metros)	15	0,3	4,5
Baterías de UPS	12V / 7AH	3	12	36

<b>TOTAL</b>	<b>6219,11</b>
--------------	----------------

## APENDICE I

### ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LA ESTACION MULTIPARAMETRICA

#### Mark Products L28



**Channel Order**  
(positive voltage on DAS channel means ground moved in given direction)

- 1 Down
- 2 North or transverse
- 3 East or radial

**Sensitivity**

30.4 Volts / meter / sec

**Calibration constant**

N/A no cal coils

**Typical DAS parameters**A-07 / A-06

Gain 32 / 2048 or 8192

Cal Amplitude N/A

Cal Interval N/A

Cal Step Size N/A

**Physical Characteristics:**

**Size** Case 8x20x6 cm with 8 cm spikes

**Weight** 2 kg.

**Shipping Weight** 60 lbs (10) **Size** 18x24x14 inches

**Power consumption** (Rbox)

None, passive sensor

**Frequency Response:**

**Natural Freq.** 4.5 Hz.

**Damping** 0.700 critical

**Zeros** two at zero

**Poles** -19.99 + 19.99i

-19.99 - 19.99i

**Installation Tips:**

- 1) Determine approximate azimuth
- 2) Dig shallow trench 4-6 inches deep, 4 inches wide and 14 inches long.
- 3) Check azimuth and push sensor into ground so that it's level.
- 4) Cover sensor and a few feet of the cable with soil.
- 5) Plug sensor into DAS
- 6) Check DAS Monitor or Offset function for proper operation.



# PIC16F87XA

## 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F876A
- PIC16F874A
- PIC16F877A

### High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input  
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin  
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during Sleep via external  
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™  
(Master mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with  
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

### Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital  
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference  
(VREF) module
  - Programmable input multiplexing from device  
inputs and internal voltage reference
  - Comparator outputs are externally accessible

### Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash  
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM  
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)  
via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

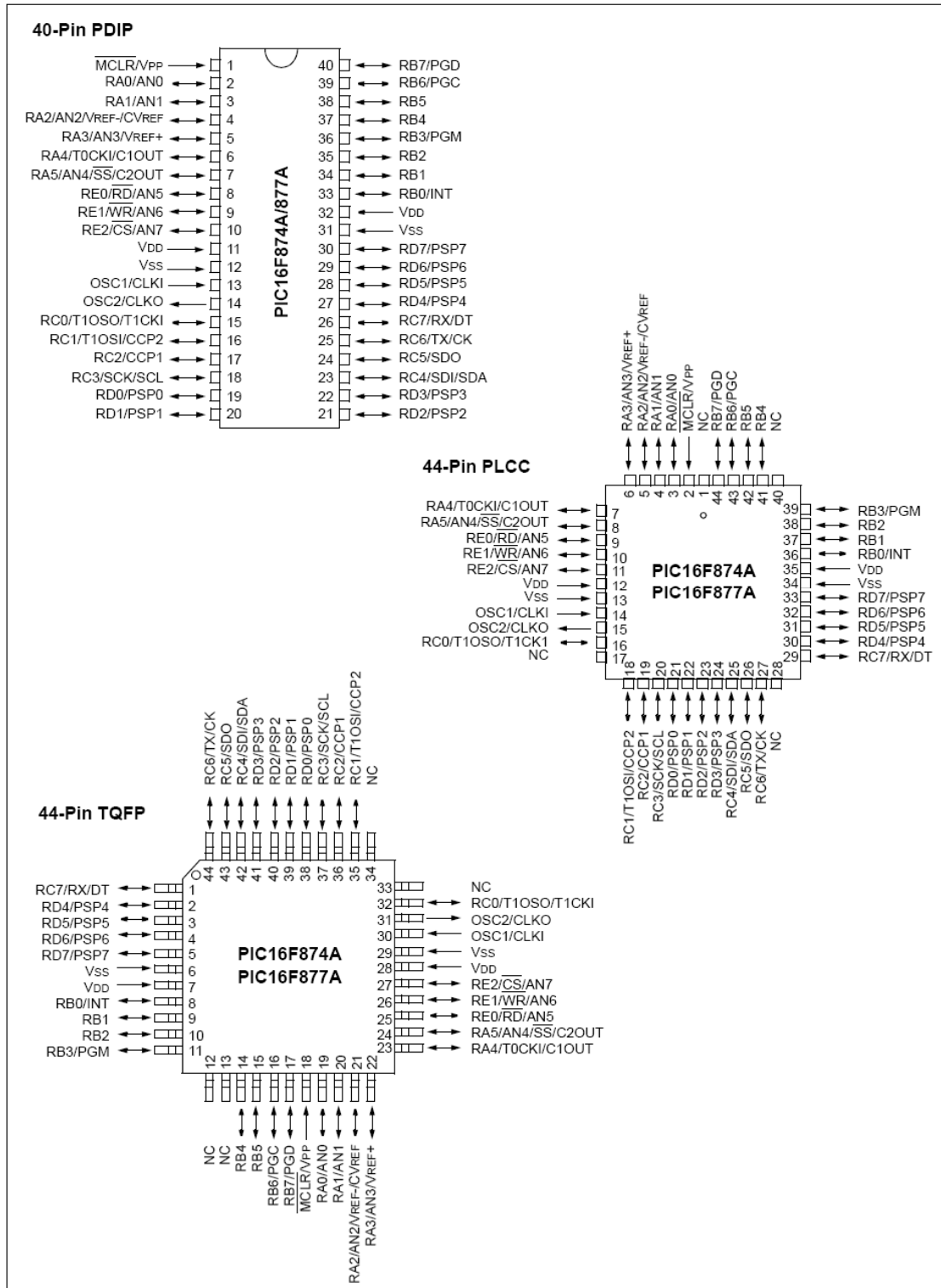
### CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM  
technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I <sup>2</sup> C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

# PIC16F87XA

## Pin Diagrams (Continued)



# PIC16F87XA

## 1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device specific information about the following devices:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

PIC16F873A/876A devices are available only in 28-pin packages, while PIC16F874A/877A devices are available in 40-pin and 44-pin packages. All devices in the PIC16F87XA family share common architecture with the following differences:

- The PIC16F873A and PIC16F874A have one-half of the total on-chip memory of the PIC16F876A and PIC16F877A
- The 28-pin devices have three I/O ports, while the 40/44-pin devices have five
- The 28-pin devices have fourteen interrupts, while the 40/44-pin devices have fifteen
- The 28-pin devices have five A/D input channels, while the 40/44-pin devices have eight
- The Parallel Slave Port is implemented only on the 40/44-pin devices

The available features are summarized in Table 1-1. Block diagrams of the PIC16F873A/876A and PIC16F874A/877A devices are provided in Figure 1-1 and Figure 1-2, respectively. The pinouts for these device families are listed in Table 1-2 and Table 1-3.

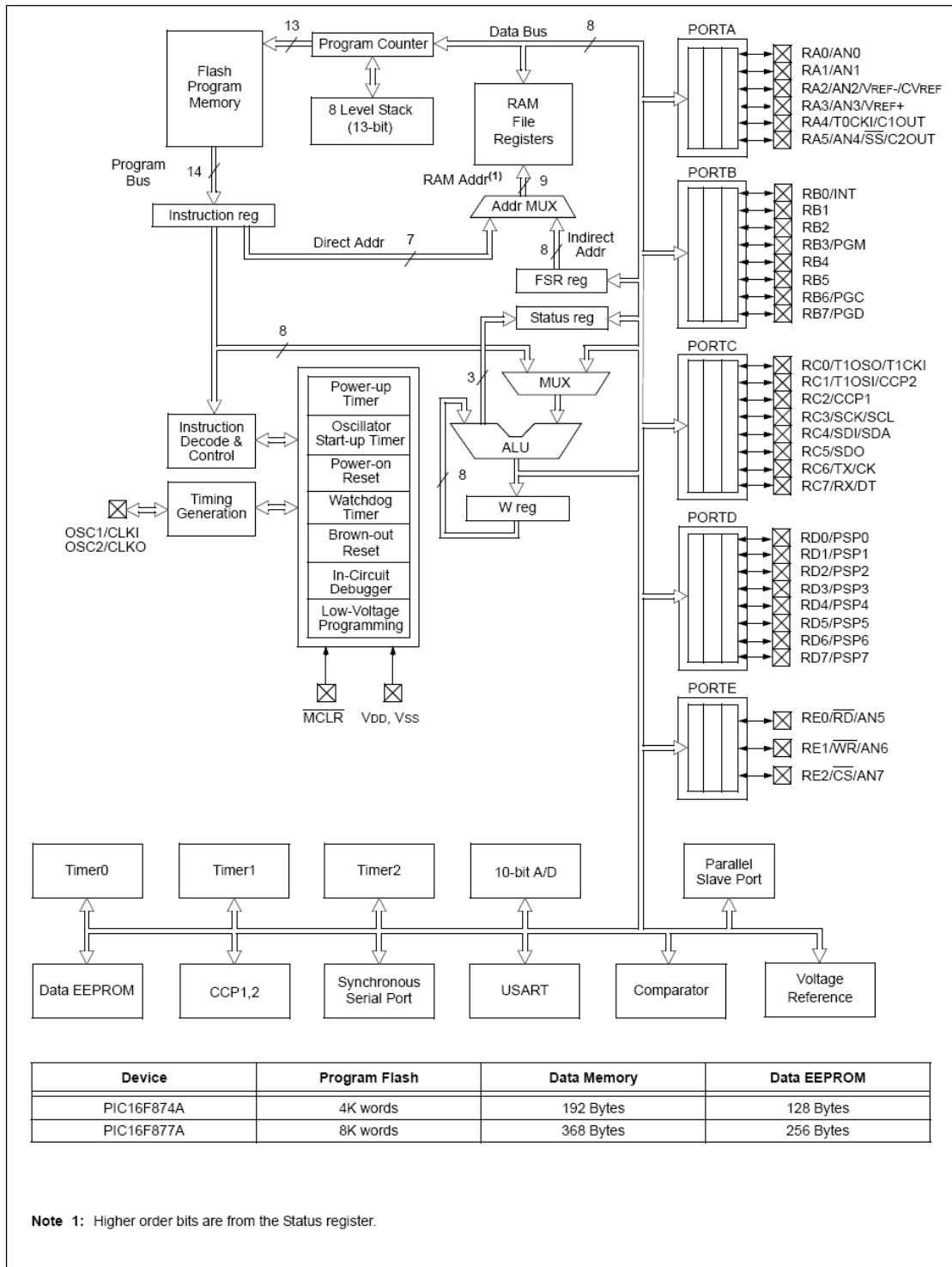
Additional information may be found in the PICmicro® Mid-Range Reference Manual (DS33023), which may be obtained from your local Microchip Sales Representative or downloaded from the Microchip web site. The Reference Manual should be considered a complementary document to this data sheet and is highly recommended reading for a better understanding of the device architecture and operation of the peripheral modules.

**TABLE 1-1: PIC16F87XA DEVICE FEATURES**

Key Features	PIC16F873A	PIC16F874A	PIC16F876A	PIC16F877A
Operating Frequency	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory (bytes)	128	128	256	256
Interrupts	14	15	14	15
I/O Ports	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Analog Comparators	2	2	2	2
Instruction Set	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN

# PIC16F87XA

**FIGURE 1-2: PIC16F874A/877A BLOCK DIAGRAM**



## 5.0 TIMER0 MODULE

The Timer0 module timer/counter has the following features:

- 8-bit timer/counter
- Readable and writable
- 8-bit software programmable prescaler
- Internal or external clock select
- Interrupt on overflow from FFh to 00h
- Edge select for external clock

Figure 5-1 is a block diagram of the Timer0 module and the prescaler shared with the WDT.

Additional information on the Timer0 module is available in the PICmicro® Mid-Range MCU Family Reference Manual (DS33023).

Timer mode is selected by clearing bit T0CS (OPTION\_REG<5>). In Timer mode, the Timer0 module will increment every instruction cycle (without prescaler). If the TMR0 register is written, the increment is inhibited for the following two instruction cycles. The user can work around this by writing an adjusted value to the TMR0 register.

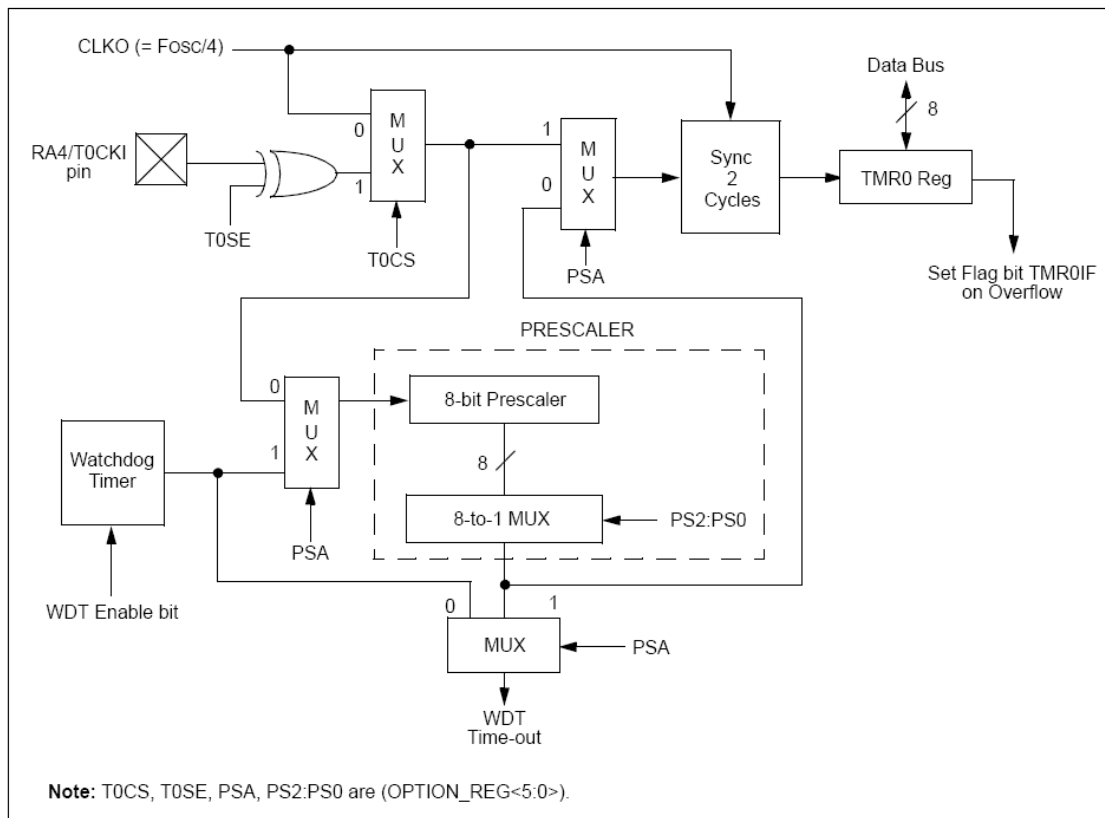
Counter mode is selected by setting bit T0CS (OPTION\_REG<5>). In Counter mode, Timer0 will increment either on every rising or falling edge of pin RA4/T0CKI. The incrementing edge is determined by the Timer0 Source Edge Select bit, T0SE (OPTION\_REG<4>). Clearing bit T0SE selects the rising edge. Restrictions on the external clock input are discussed in detail in Section 5.2 “Using Timer0 with an External Clock”.

The prescaler is mutually exclusively shared between the Timer0 module and the Watchdog Timer. The prescaler is not readable or writable. Section 5.3 “Prescaler” details the operation of the prescaler.

### 5.1 Timer0 Interrupt

The TMR0 interrupt is generated when the TMR0 register overflows from FFh to 00h. This overflow sets bit TMR0IF (INTCON<2>). The interrupt can be masked by clearing bit TMR0IE (INTCON<5>). Bit TMR0IF must be cleared in software by the Timer0 module Interrupt Service Routine before re-enabling this interrupt. The TMR0 interrupt cannot awaken the processor from Sleep since the timer is shut-off during Sleep.

**FIGURE 5-1: BLOCK DIAGRAM OF THE TIMER0/WDT PRESCALER**





# PIC16F87XA

## 5.2 Using Timer0 with an External Clock

When no prescaler is used, the external clock input is the same as the prescaler output. The synchronization of T0CKI with the internal phase clocks is accomplished by sampling the prescaler output on the Q2 and Q4 cycles of the internal phase clocks. Therefore, it is necessary for T0CKI to be high for at least 2 T<sub>OSC</sub> (and a small RC delay of 20 ns) and low for at least 2 T<sub>OSC</sub> (and a small RC delay of 20 ns). Refer to the electrical specification of the desired device.

## 5.3 Prescaler

There is only one prescaler available which is mutually exclusively shared between the Timer0 module and the Watchdog Timer. A prescaler assignment for the

Timer0 module means that there is no prescaler for the Watchdog Timer and vice versa. This prescaler is not readable or writable (see Figure 5-1).

The PSA and PS2:PS0 bits (OPTION\_REG<3:0>) determine the prescaler assignment and prescale ratio.

When assigned to the Timer0 module, all instructions writing to the TMR0 register (e.g., CLRF 1, MOVWF 1, BSF 1, x....etc.) will clear the prescaler. When assigned to WDT, a CLRWDT instruction will clear the prescaler along with the Watchdog Timer. The prescaler is not readable or writable.

**Note:** Writing to TMR0 when the prescaler is assigned to Timer0 will clear the prescaler count, but will not change the prescaler assignment.

**REGISTER 5-1: OPTION\_REG REGISTER**

	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1
	RBP $\overline{U}$	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0
	bit 7							bit 0
bit 7	<b>RBP<math>\overline{U}</math></b>							
bit 6	<b>INTEDG</b>							
bit 5	<b>T0CS:</b> TMR0 Clock Source Select bit							
	1 = Transition on T0CKI pin							
	0 = Internal instruction cycle clock (CLKO)							
bit 4	<b>T0SE:</b> TMR0 Source Edge Select bit							
	1 = Increment on high-to-low transition on T0CKI pin							
	0 = Increment on low-to-high transition on T0CKI pin							
bit 3	<b>PSA:</b> Prescaler Assignment bit							
	1 = Prescaler is assigned to the WDT							
	0 = Prescaler is assigned to the Timer0 module							
bit 2-0	<b>PS2:PS0:</b> Prescaler Rate Select bits							
	Bit Value	TMR0 Rate	WDT Rate					
	000	1 : 2	1 : 1					
	001	1 : 4	1 : 2					
	010	1 : 8	1 : 4					
	011	1 : 16	1 : 8					
	100	1 : 32	1 : 16					
	101	1 : 64	1 : 32					
	110	1 : 128	1 : 64					
	111	1 : 256	1 : 128					

**Legend:**

R = Readable bit                      W = Writable bit                      U = Unimplemented bit, read as '0'  
 - n = Value at POR                      '1' = Bit is set                      '0' = Bit is cleared                      x = Bit is unknown

**Note:** To avoid an unintended device Reset, the instruction sequence shown in the PICmicro® Mid-Range MCU Family Reference Manual (DS33023) must be executed when changing the prescaler assignment from Timer0 to the WDT. This sequence must be followed even if the WDT is disabled.

# PIC16F87XA

**TABLE 5-1: REGISTERS ASSOCIATED WITH TIMER0**

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other Resets
01h,101h	TMR0	Timer0 Module Register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
0Bh,8Bh, 10Bh,18Bh	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
81h,181h	OPTION_REG	RBPV	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111

**Legend:** x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented locations read as '0'. Shaded cells are not used by Timer0.

## 10.0 ADDRESSABLE UNIVERSAL SYNCHRONOUS ASYNCHRONOUS RECEIVER TRANSMITTER (USART)

The Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART) module is one of the two serial I/O modules. (USART is also known as a Serial Communications Interface or SCI.) The USART can be configured as a full-duplex asynchronous system that can communicate with peripheral devices, such as CRT terminals and personal computers, or it can be configured as a half-duplex synchronous system that can communicate with peripheral devices, such as A/D or D/A integrated circuits, serial EEPROMs, etc.

The USART can be configured in the following modes:

- Asynchronous (full-duplex)
- Synchronous – Master (half-duplex)
- Synchronous – Slave (half-duplex)

Bit SPEN (RCSTA<7>) and bits TRISC<7:6> have to be set in order to configure pins RC6/TX/CK and RC7/RX/DT as the Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter.

The USART module also has a multi-processor communication capability using 9-bit address detection.

### REGISTER 10-1: TXSTA: TRANSMIT STATUS AND CONTROL REGISTER (ADDRESS 98h)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0	R-1	R/W-0	
CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	
bit 7							bit 0	

- bit 7 **CSRC:** Clock Source Select bit  
Asynchronous mode:  
 Don't care.  
Synchronous mode:  
 1 = Master mode (clock generated internally from BRG)  
 0 = Slave mode (clock from external source)
- bit 6 **TX9:** 9-bit Transmit Enable bit  
 1 = Selects 9-bit transmission  
 0 = Selects 8-bit transmission
- bit 5 **TXEN:** Transmit Enable bit  
 1 = Transmit enabled  
 0 = Transmit disabled  
**Note:** SREN/CREN overrides TXEN in Sync mode.
- bit 4 **SYNC:** USART Mode Select bit  
 1 = Synchronous mode  
 0 = Asynchronous mode
- bit 3 **Unimplemented:** Read as '0'
- bit 2 **BRGH:** High Baud Rate Select bit  
Asynchronous mode:  
 1 = High speed  
 0 = Low speed  
Synchronous mode:  
 Unused in this mode.
- bit 1 **TRMT:** Transmit Shift Register Status bit  
 1 = TSR empty  
 0 = TSR full
- bit 0 **TX9D:** 9th bit of Transmit Data, can be Parity bit

Legend:			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
- n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

# PIC16F87XA

## REGISTER 10-2: RCSTA: RECEIVE STATUS AND CONTROL REGISTER (ADDRESS 18h)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R-0	R-0	R-x
SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
							bit 0
							bit 7

- bit 7 **SPEN:** Serial Port Enable bit  
 1 = Serial port enabled (configures RC7/RX/DT and RC6/TX/CK pins as serial port pins)  
 0 = Serial port disabled
- bit 6 **RX9:** 9-bit Receive Enable bit  
 1 = Selects 9-bit reception  
 0 = Selects 8-bit reception
- bit 5 **SREN:** Single Receive Enable bit  
Asynchronous mode:  
 Don't care.  
Synchronous mode – Master:  
 1 = Enables single receive  
 0 = Disables single receive  
 This bit is cleared after reception is complete.  
Synchronous mode – Slave:  
 Don't care.
- bit 4 **CREN:** Continuous Receive Enable bit  
Asynchronous mode:  
 1 = Enables continuous receive  
 0 = Disables continuous receive  
Synchronous mode:  
 1 = Enables continuous receive until enable bit CREN is cleared (CREN overrides SREN)  
 0 = Disables continuous receive
- bit 3 **ADDEN:** Address Detect Enable bit  
Asynchronous mode 9-bit (RX9 = 1):  
 1 = Enables address detection, enables interrupt and load of the receive buffer when RSR<8> is set  
 0 = Disables address detection, all bytes are received and ninth bit can be used as parity bit
- bit 2 **FERR:** Framing Error bit  
 1 = Framing error (can be updated by reading RCREG register and receive next valid byte)  
 0 = No framing error
- bit 1 **OERR:** Overrun Error bit  
 1 = Overrun error (can be cleared by clearing bit CREN)  
 0 = No overrun error
- bit 0 **RX9D:** 9th bit of Received Data (can be parity bit but must be calculated by user firmware)

Legend:			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
- n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

## 10.1 USART Baud Rate Generator (BRG)

The BRG supports both the Asynchronous and Synchronous modes of the USART. It is a dedicated 8-bit baud rate generator. The SPBRG register controls the period of a free running 8-bit timer. In Asynchronous mode, bit BRGH (TXSTA<2>) also controls the baud rate. In Synchronous mode, bit BRGH is ignored. Table 10-1 shows the formula for computation of the baud rate for different USART modes which only apply in Master mode (internal clock).

Given the desired baud rate and  $F_{OSC}$ , the nearest integer value for the SPBRG register can be calculated using the formula in Table 10-1. From this, the error in baud rate can be determined.

It may be advantageous to use the high baud rate (BRGH = 1) even for slower baud clocks. This is because the  $F_{OSC}/(16(X+1))$  equation can reduce the baud rate error in some cases.

Writing a new value to the SPBRG register causes the BRG timer to be reset (or cleared). This ensures the BRG does not wait for a timer overflow before outputting the new baud rate.

### 10.1.1 SAMPLING

The data on the RC7/RX/DT pin is sampled three times by a majority detect circuit to determine if a high or a low level is present at the RX pin.

**TABLE 10-1: BAUD RATE FORMULA**

SYNC	BRGH = 0 (Low Speed)	BRGH = 1 (High Speed)
0	(Asynchronous) Baud Rate = $F_{OSC}/(64(X+1))$	Baud Rate = $F_{OSC}/(16(X+1))$
1	(Synchronous) Baud Rate = $F_{OSC}/(4(X+1))$	N/A

**Legend:** X = value in SPBRG (0 to 255)

**TABLE 10-2: REGISTERS ASSOCIATED WITH BAUD RATE GENERATOR**

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other Resets
98h	TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010	0000 -010
18h	RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D	0000 000x	0000 000x
99h	SPBRG	Baud Rate Generator Register								0000 0000	0000 0000

**Legend:** x = unknown, - = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by the BRG.

# PIC16F87XA

**TABLE 10-3: BAUD RATES FOR ASYNCHRONOUS MODE (BRGH = 0)**

BAUD RATE (K)	Fosc = 20 MHz			Fosc = 16 MHz			Fosc = 10 MHz		
	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)
0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.2	1.221	1.75	255	1.202	0.17	207	1.202	0.17	129
2.4	2.404	0.17	129	2.404	0.17	103	2.404	0.17	64
9.6	9.766	1.73	31	9.615	0.16	25	9.766	1.73	15
19.2	19.531	1.72	15	19.231	0.16	12	19.531	1.72	7
28.8	31.250	8.51	9	27.778	3.55	8	31.250	8.51	4
33.6	34.722	3.34	8	35.714	6.29	6	31.250	6.99	4
57.6	62.500	8.51	4	62.500	8.51	3	52.083	9.58	2
HIGH	1.221	-	255	0.977	-	255	0.610	-	255
LOW	312.500	-	0	250.000	-	0	156.250	-	0

BAUD RATE (K)	Fosc = 4 MHz			Fosc = 3.6864 MHz		
	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)
0.3	0.300	0	207	0.3	0	191
1.2	1.202	0.17	51	1.2	0	47
2.4	2.404	0.17	25	2.4	0	23
9.6	8.929	6.99	6	9.6	0	5
19.2	20.833	8.51	2	19.2	0	2
28.8	31.250	8.51	1	28.8	0	1
33.6	-	-	-	-	-	-
57.6	62.500	8.51	0	57.6	0	0
HIGH	0.244	-	255	0.225	-	255
LOW	62.500	-	0	57.6	-	0

**TABLE 10-4: BAUD RATES FOR ASYNCHRONOUS MODE (BRGH = 1)**

BAUD RATE (K)	Fosc = 20 MHz			Fosc = 16 MHz			Fosc = 10 MHz		
	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)
0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	-	-	-	-	-	-	2.441	1.71	255
9.6	9.615	0.16	129	9.615	0.16	103	9.615	0.16	64
19.2	19.231	0.16	64	19.231	0.16	51	19.531	1.72	31
28.8	29.070	0.94	42	29.412	2.13	33	28.409	1.36	21
33.6	33.784	0.55	36	33.333	0.79	29	32.895	2.10	18
57.6	59.524	3.34	20	58.824	2.13	16	56.818	1.36	10
HIGH	4.883	-	255	3.906	-	255	2.441	-	255
LOW	1250.000	-	0	1000.000	-	0	625.000	-	0

BAUD RATE (K)	Fosc = 4 MHz			Fosc = 3.6864 MHz		
	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)
0.3	-	-	-	-	-	-
1.2	1.202	0.17	207	1.2	0	191
2.4	2.404	0.17	103	2.4	0	95
9.6	9.615	0.16	25	9.6	0	23
19.2	19.231	0.16	12	19.2	0	11
28.8	27.798	3.55	8	28.8	0	7
33.6	35.714	6.29	6	32.9	2.04	6
57.6	62.500	8.51	3	57.6	0	3
HIGH	0.977	-	255	0.9	-	255
LOW	250.000	-	0	230.4	-	0

## 11.0 ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D) MODULE

The Analog-to-Digital (A/D) Converter module has five inputs for the 28-pin devices and eight for the 40/44-pin devices.

The conversion of an analog input signal results in a corresponding 10-bit digital number. The A/D module has high and low-voltage reference input that is software selectable to some combination of VDD, VSS, RA2 or RA3.

The A/D converter has a unique feature of being able to operate while the device is in Sleep mode. To operate in Sleep, the A/D clock must be derived from the A/D's internal RC oscillator.

The A/D module has four registers. These registers are:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- A/D Control Register 0 (ADCON0)
- A/D Control Register 1 (ADCON1)

The ADCON0 register, shown in Register 11-1, controls the operation of the A/D module. The ADCON1 register, shown in Register 11-2, configures the functions of the port pins. The port pins can be configured as analog inputs (RA3 can also be the voltage reference) or as digital I/O.

Additional information on using the A/D module can be found in the PICmicro® Mid-Range MCU Family Reference Manual (DS33023).

### REGISTER 11-1: ADCON0 REGISTER (ADDRESS 1Fh)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0
ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON
						bit 7	bit 0

bit 7-6 **ADCS1:ADCS0:** A/D Conversion Clock Select bits (ADCON0 bits in bold)

ADCON1 <ADCS2>	ADCON0 <ADCS1:ADCS0>	Clock Conversion
0	<b>00</b>	Fosc/2
0	<b>01</b>	Fosc/8
0	<b>10</b>	Fosc/32
0	<b>11</b>	FRC (clock derived from the internal A/D RC oscillator)
1	<b>00</b>	Fosc/4
1	<b>01</b>	Fosc/16
1	<b>10</b>	Fosc/64
1	<b>11</b>	FRC (clock derived from the internal A/D RC oscillator)

bit 5-3 **CHS2:CHS0:** Analog Channel Select bits

- 000 = Channel 0 (AN0)
- 001 = Channel 1 (AN1)
- 010 = Channel 2 (AN2)
- 011 = Channel 3 (AN3)
- 100 = Channel 4 (AN4)
- 101 = Channel 5 (AN5)
- 110 = Channel 6 (AN6)
- 111 = Channel 7 (AN7)

**Note:** The PIC16F873A/876A devices only implement A/D channels 0 through 4; the unimplemented selections are reserved. Do not select any unimplemented channels with these devices.

bit 2 **GO/DONE:** A/D Conversion Status bit

When **ADON = 1;**

- 1 = A/D conversion in progress (setting this bit starts the A/D conversion which is automatically cleared by hardware when the A/D conversion is complete)
- 0 = A/D conversion not in progress

bit 1 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 0 **ADON:** A/D On bit

- 1 = A/D converter module is powered up
- 0 = A/D converter module is shut-off and consumes no operating current

<b>Legend:</b>			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
- n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

# PIC16F87XA

## REGISTER 11-2: ADCON1 REGISTER (ADDRESS 9Fh)

R/W-0	R/W-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7				bit 0			

bit 7 **ADFM:** A/D Result Format Select bit

1 = Right justified. Six (6) Most Significant bits of ADRESH are read as '0'.  
0 = Left justified. Six (6) Least Significant bits of ADRESL are read as '0'.

bit 6 **ADCS2:** A/D Conversion Clock Select bit (ADCON1 bits in shaded area and in bold)

ADCON1 <ADCS2>	ADCON0 <ADCS1:ADCS0>	Clock Conversion
0	00	Fosc/2
0	01	Fosc/8
0	10	Fosc/32
0	11	FRC (clock derived from the internal A/D RC oscillator)
1	00	Fosc/4
1	01	Fosc/16
1	10	Fosc/64
1	11	FRC (clock derived from the internal A/D RC oscillator)

bit 5-4 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 3-0 **PCFG3:PCFG0:** A/D Port Configuration Control bits

PCFG <3:0>	AN7	AN6	AN5	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0	VREF+	VREF-	C/R
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	AN3	VSS	2/1
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	—	—	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	AN3	AN2	1/2

A = Analog input D = Digital I/O

C/R = # of analog input channels/# of A/D voltage references

### Legend:

R = Readable bit

W = Writable bit

U = Unimplemented bit, read as '0'

- n = Value at POR

'1' = Bit is set

'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

**Note:** On any device Reset, the port pins that are multiplexed with analog functions (ANx) are forced to be an analog input.



# PIC16F87XA

The ADRESH:ADRESL registers contain the 10-bit result of the A/D conversion. When the A/D conversion is complete, the result is loaded into this A/D Result register pair, the GO/DONE bit (ADCON0<2>) is cleared and the A/D interrupt flag bit ADIF is set. The block diagram of the A/D module is shown in Figure 11-1.

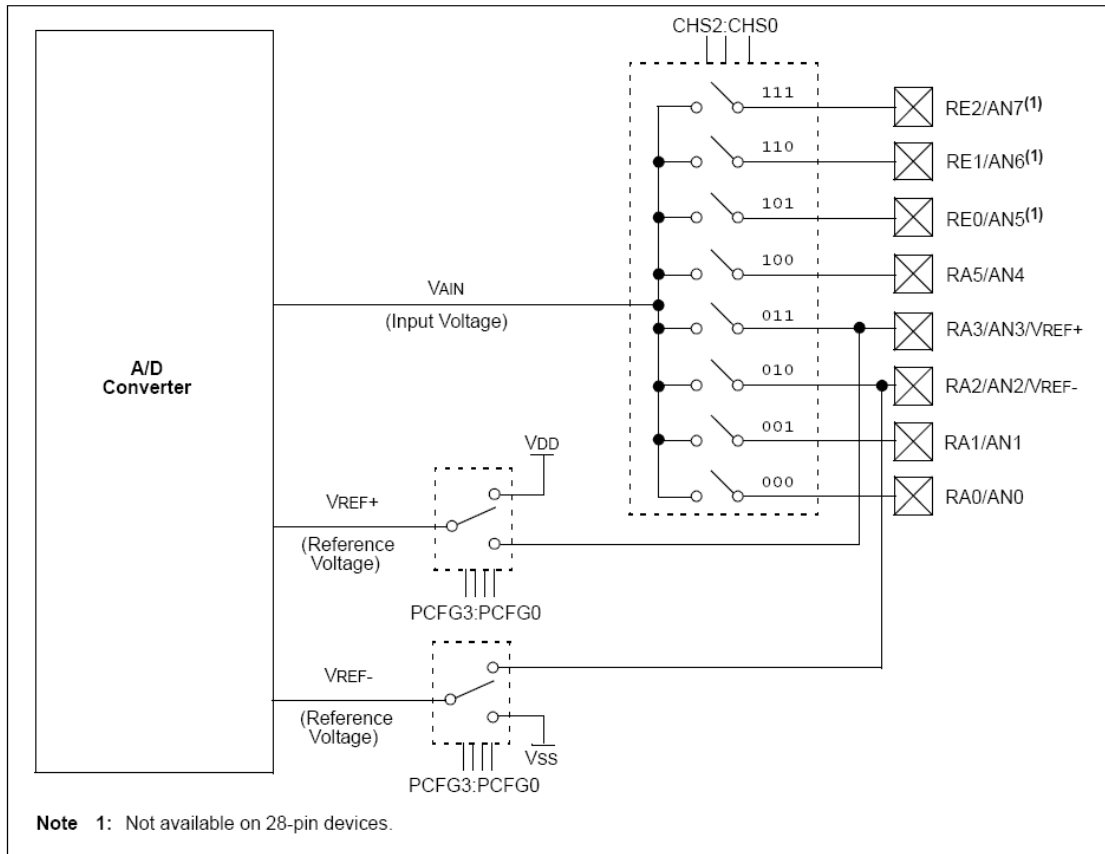
After the A/D module has been configured as desired, the selected channel must be acquired before the conversion is started. The analog input channels must have their corresponding TRIS bits selected as inputs.

To determine sample time, see Section 11.1 “A/D Acquisition Requirements”. After this acquisition time has elapsed, the A/D conversion can be started.

To do an A/D Conversion, follow these steps:

1. Configure the A/D module:
  - Configure analog pins/voltage reference and digital I/O (ADCON1)
  - Select A/D input channel (ADCON0)
  - Select A/D conversion clock (ADCON0)
  - Turn on A/D module (ADCON0)
2. Configure A/D interrupt (if desired):
  - Clear ADIF bit
  - Set ADIE bit
  - Set PEIE bit
  - Set GIE bit
3. Wait the required acquisition time.
4. Start conversion:
  - Set GO/DONE bit (ADCON0)
5. Wait for A/D conversion to complete by either:
  - Polling for the GO/DONE bit to be cleared (interrupts disabled); OR
  - Waiting for the A/D interrupt
6. Read A/D Result register pair (ADRESH:ADRESL), clear bit ADIF if required.
7. For the next conversion, go to step 1 or step 2 as required. The A/D conversion time per bit is defined as TAD.

**FIGURE 11-1: A/D BLOCK DIAGRAM**



# PIC16F87XA

## 11.1 A/D Acquisition Requirements

For the A/D converter to meet its specified accuracy, the charge holding capacitor (CHOLD) must be allowed to fully charge to the input channel voltage level. The analog input model is shown in Figure 11-2. The source impedance (RS) and the internal sampling switch impedance (RSS) directly affect the time required to charge the capacitor CHOLD. The sampling switch (RSS) impedance varies over the device voltage (VDD); see Figure 11-2. The maximum recommended impedance for analog sources is 2.5 kΩ. As the impedance is decreased, the acquisition time may be

decreased. After the analog input channel is selected (changed), this acquisition must be done before the conversion can be started.

To calculate the minimum acquisition time, Equation 11-1 may be used. This equation assumes that 1/2 LSB error is used (1024 steps for the A/D). The 1/2 LSB error is the maximum error allowed for the A/D to meet its specified resolution.

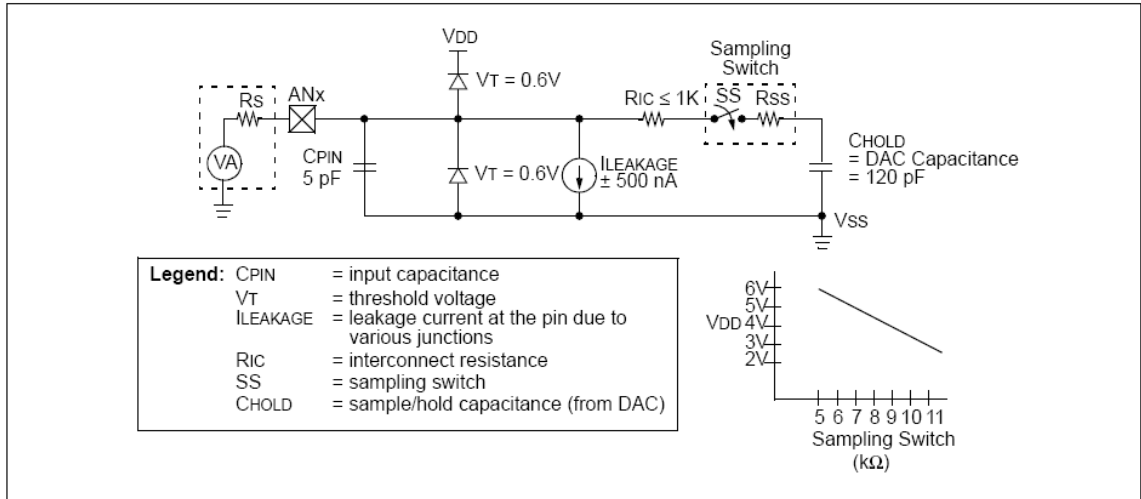
To calculate the minimum acquisition time, TACQ, see the PICmicro® Mid-Range MCU Family Reference Manual (DS33023).

### EQUATION 11-1: ACQUISITION TIME

TACQ	=	Amplifier Settling Time + Hold Capacitor Charging Time + Temperature Coefficient
	=	TAMP + TC + TCOFF
	=	2 μs + TC + [(Temperature - 25°C)(0.05 μs/°C)]
TC	=	CHOLD (RIC + RSS + RS) ln(1/2047)
	=	- 120 pF (1 kΩ + 7 kΩ + 10 kΩ) ln(0.0004885)
	=	16.47 μs
TACQ	=	2 μs + 16.47 μs + [(50°C - 25°C)(0.05 μs/°C)]
	=	19.72 μs

- Note 1:** The reference voltage (VREF) has no effect on the equation since it cancels itself out.
- 2:** The charge holding capacitor (CHOLD) is not discharged after each conversion.
- 3:** The maximum recommended impedance for analog sources is 2.5 kΩ. This is required to meet the pin leakage specification.

FIGURE 11-2: ANALOG INPUT MODEL



## 11.2 Selecting the A/D Conversion Clock

The A/D conversion time per bit is defined as  $T_{AD}$ . The A/D conversion requires a minimum  $12 T_{AD}$  per 10-bit conversion. The source of the A/D conversion clock is software selected. The seven possible options for  $T_{AD}$  are:

- $2 T_{OSC}$
- $4 T_{OSC}$
- $8 T_{OSC}$
- $16 T_{OSC}$
- $32 T_{OSC}$
- $64 T_{OSC}$
- Internal A/D module RC oscillator (2-6  $\mu$ s)

For correct A/D conversions, the A/D conversion clock ( $T_{AD}$ ) must be selected to ensure a minimum  $T_{AD}$  time of 1.6  $\mu$ s.

Table 11-1 shows the resultant  $T_{AD}$  times derived from the device operating frequencies and the A/D clock source selected.

## 11.3 Configuring Analog Port Pins

The ADCON1 and TRIS registers control the operation of the A/D port pins. The port pins that are desired as analog inputs must have their corresponding TRIS bits set (input). If the TRIS bit is cleared (output), the digital output level ( $V_{OH}$  or  $V_{OL}$ ) will be converted.

The A/D operation is independent of the state of the CHS2:CHS0 bits and the TRIS bits.

**Note 1:** When reading the port register, any pin configured as an analog input channel will read as cleared (a low level). Pins configured as digital inputs will convert an analog input. Analog levels on a digitally configured input will not affect the conversion accuracy.

**2:** Analog levels on any pin that is defined as a digital input (including the AN7:AN0 pins) may cause the input buffer to consume current that is out of the device specifications.

**TABLE 11-1:  $T_{AD}$  vs. MAXIMUM DEVICE OPERATING FREQUENCIES (STANDARD DEVICES (F))**

AD Clock Source ( $T_{AD}$ )		Maximum Device Frequency
Operation	ADCS2:ADCS1:ADCS0	
$2 T_{OSC}$	000	1.25 MHz
$4 T_{OSC}$	100	2.5 MHz
$8 T_{OSC}$	001	5 MHz
$16 T_{OSC}$	101	10 MHz
$32 T_{OSC}$	010	20 MHz
$64 T_{OSC}$	110	20 MHz
RC <sup>(1, 2, 3)</sup>	x11	(Note 1)

**Note 1:** The RC source has a typical  $T_{AD}$  time of 4  $\mu$ s but can vary between 2-6  $\mu$ s.

**2:** When the device frequencies are greater than 1 MHz, the RC A/D conversion clock source is only recommended for Sleep operation.

**3:** For extended voltage devices (LF), please refer to **Section 17.0 "Electrical Characteristics"**.

# PIC16F87XA

## 11.4 A/D Conversions

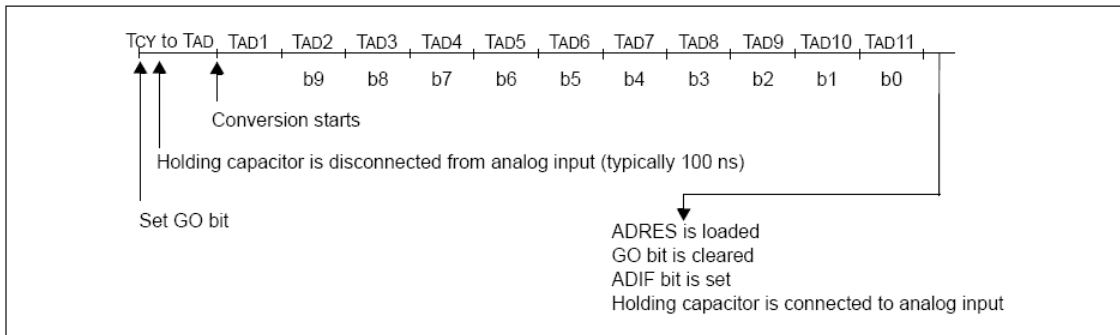
Clearing the  $\overline{\text{GO/DONE}}$  bit during a conversion will abort the current conversion. The A/D Result register pair will NOT be updated with the partially completed A/D conversion sample. That is, the ADRESH:ADRESL registers will continue to contain the value of the last completed conversion (or the last value written to the ADRESH:ADRESL registers). After the A/D conversion

is aborted, the next acquisition on the selected channel is automatically started. The  $\overline{\text{GO/DONE}}$  bit can then be set to start the conversion.

In Figure 11-3, after the GO bit is set, the first time segment has a minimum of  $T_{CY}$  and a maximum of  $T_{AD}$ .

**Note:** The  $\overline{\text{GO/DONE}}$  bit should **NOT** be set in the same instruction that turns on the A/D.

**FIGURE 11-3: A/D CONVERSION TAD CYCLES**

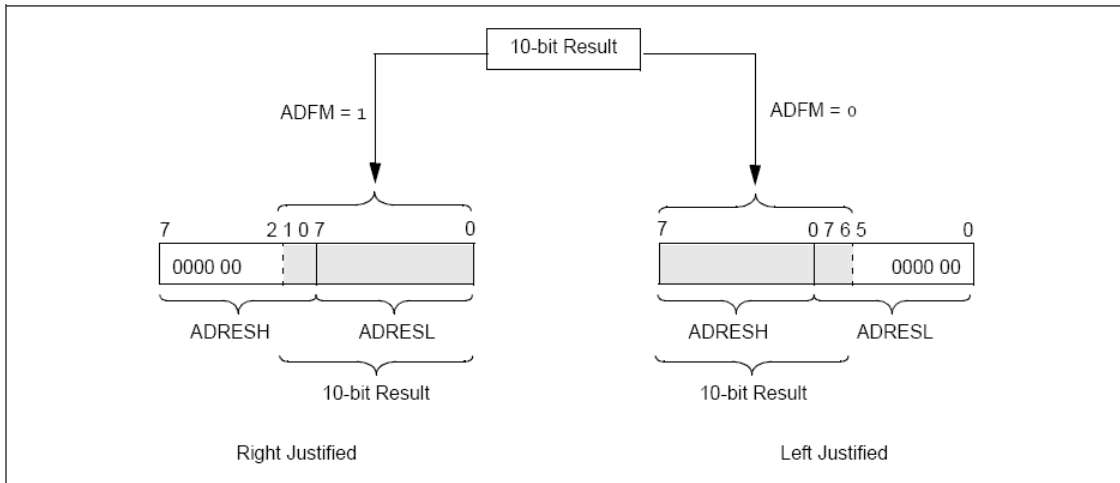


### 11.4.1 A/D RESULT REGISTERS

The ADRESH:ADRESL register pair is the location where the 10-bit A/D result is loaded at the completion of the A/D conversion. This register pair is 16 bits wide. The A/D module gives the flexibility to left or right justify the 10-bit result in the 16-bit result register. The A/D

Format Select bit (ADFM) controls this justification. Figure 11-4 shows the operation of the A/D result justification. The extra bits are loaded with '0's. When an A/D result will not overwrite these locations (A/D disable), these registers may be used as two general purpose 8-bit registers.

**FIGURE 11-4: A/D RESULT JUSTIFICATION**



# PIC16F87XA

## 11.5 A/D Operation During Sleep

The A/D module can operate during Sleep mode. This requires that the A/D clock source be set to RC (ADCS1:ADCS0 = 11). When the RC clock source is selected, the A/D module waits one instruction cycle before starting the conversion. This allows the SLEEP instruction to be executed which eliminates all digital switching noise from the conversion. When the conversion is completed, the GO/DONE bit will be cleared and the result loaded into the ADRES register. If the A/D interrupt is enabled, the device will wake-up from Sleep. If the A/D interrupt is not enabled, the A/D module will then be turned off, although the ADON bit will remain set.

When the A/D clock source is another clock option (not RC), a SLEEP instruction will cause the present conversion to be aborted and the A/D module to be turned off, though the ADON bit will remain set.

Turning off the A/D places the A/D module in its lowest current consumption state.

**Note:** For the A/D module to operate in Sleep, the A/D clock source must be set to RC (ADCS1:ADCS0 = 11). To allow the conversion to occur during Sleep, ensure the SLEEP instruction immediately follows the instruction that sets the GO/DONE bit.

## 11.6 Effects of a Reset

A device Reset forces all registers to their Reset state. This forces the A/D module to be turned off and any conversion is aborted. All A/D input pins are configured as analog inputs.

The value that is in the ADRESH:ADRESL registers is not modified for a Power-on Reset. The ADRESH:ADRESL registers will contain unknown data after a Power-on Reset.

**TABLE 11-2: REGISTERS/BITS ASSOCIATED WITH A/D**

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR, BOR	Value on MCLR, WDT
0Bh,8Bh, 10Bh,18Bh	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
0Ch	PIR1	PSPIF <sup>(1)</sup>	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	0000 0000	0000 0000
8Ch	PIE1	PSPIE <sup>(1)</sup>	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	0000 0000	0000 0000
1Eh	ADRESH	A/D Result Register High Byte								xxxx xxxx	uuuu uuuu
9Eh	ADRESL	A/D Result Register Low Byte								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Fh	ADCON0	ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON	0000 00-0	0000 00-0
9Fh	ADCON1	ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	00-- 0000	00-- 0000
85h	TRISA	—	—	PORTA Data Direction Register						--11 1111	--11 1111
05h	PORTA	—	—	PORTA Data Latch when written: PORTA pins when read						--0x 0000	--0u 0000
89h <sup>(1)</sup>	TRISE	IBF	OBF	IBOV	PSPMODE	—	PORTE Data Direction bits			0000 -111	0000 -111
09h <sup>(1)</sup>	PORTE	—	—	—	—	—	RE2	RE1	RE0	---- -xxx	---- -uuu

**Legend:** x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used for A/D conversion.

**Note 1:** These registers are not available on 28-pin devices.

## 17.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

### Absolute Maximum Ratings †

Ambient temperature under bias.....	-55 to +125°C
Storage temperature .....	-65°C to +150°C
Voltage on any pin with respect to V <sub>SS</sub> (except V <sub>DD</sub> , $\overline{\text{MCLR}}$ , and RA4) .....	-0.3V to (V <sub>DD</sub> + 0.3V)
Voltage on V <sub>DD</sub> with respect to V <sub>SS</sub> .....	-0.3 to +7.5V
Voltage on $\overline{\text{MCLR}}$ with respect to V <sub>SS</sub> (Note 2) .....	0 to +14V
Voltage on RA4 with respect to V <sub>SS</sub> .....	0 to +8.5V
Total power dissipation (Note 1) .....	1.0W
Maximum current out of V <sub>SS</sub> pin .....	300 mA
Maximum current into V <sub>DD</sub> pin .....	250 mA
Input clamp current, I <sub>IK</sub> (V <sub>I</sub> < 0 or V <sub>I</sub> > V <sub>DD</sub> ).....	± 20 mA
Output clamp current, I <sub>OK</sub> (V <sub>O</sub> < 0 or V <sub>O</sub> > V <sub>DD</sub> ).....	± 20 mA
Maximum output current sunk by any I/O pin.....	25 mA
Maximum output current sourced by any I/O pin .....	25 mA
Maximum current sunk by PORTA, PORTB and PORTE (combined) (Note 3) .....	200 mA
Maximum current sourced by PORTA, PORTB and PORTE (combined) (Note 3).....	200 mA
Maximum current sunk by PORTC and PORTD (combined) (Note 3) .....	200 mA
Maximum current sourced by PORTC and PORTD (combined) (Note 3) .....	200 mA

**Note 1:** Power dissipation is calculated as follows:  $P_{dis} = V_{DD} \times \{I_{DD} - \sum I_{OH}\} + \sum \{(V_{DD} - V_{OH}) \times I_{OH}\} + \sum (V_{OL} \times I_{OL})$

**2:** Voltage spikes below V<sub>SS</sub> at the  $\overline{\text{MCLR}}$  pin, inducing currents greater than 80 mA, may cause latch-up. Thus, a series resistor of 50-100Ω should be used when applying a “low” level to the  $\overline{\text{MCLR}}$  pin rather than pulling this pin directly to V<sub>SS</sub>.

**3:** PORTD and PORTE are not implemented on PIC16F873A/876A devices.

† NOTICE: Stresses above those listed under “Absolute Maximum Ratings” may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at those or any other conditions above those indicated in the operation listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

# MAXIM

## +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

**MAX220-MAX249**

### General Description

The MAX220–MAX249 family of line drivers/receivers is intended for all EIA/TIA-232E and V.28/V.24 communications interfaces, particularly applications where  $\pm 12V$  is not available.

These parts are especially useful in battery-powered systems, since their low-power shutdown mode reduces power dissipation to less than  $5\mu W$ . The MAX225, MAX233, MAX235, and MAX245/MAX246/MAX247 use no external components and are recommended for applications where printed circuit board space is critical.

### Applications

Portable Computers  
Low-Power Modems  
Interface Translation  
Battery-Powered RS-232 Systems  
Multidrop RS-232 Networks

### Features

#### Superior to Bipolar

- ◆ Operate from Single +5V Power Supply (+5V and +12V—MAX231/MAX239)
- ◆ Low-Power Receive Mode in Shutdown (MAX223/MAX242)
- ◆ Meet All EIA/TIA-232E and V.28 Specifications
- ◆ Multiple Drivers and Receivers
- ◆ 3-State Driver and Receiver Outputs
- ◆ Open-Line Detection (MAX243)

### Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX220CPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP
MAX220CSE	0°C to +70°C	16 Narrow SO
MAX220CWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MAX220C/D	0°C to +70°C	Dice*
MAX220EPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP
MAX220ESE	-40°C to +85°C	16 Narrow SO
MAX220EWE	-40°C to +85°C	16 Wide SO
MAX220EJE	-40°C to +85°C	16 CERDIP
MAX220MJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP

Ordering Information continued at end of data sheet.

\*Contact factory for dice specifications.

### Selection Table

Part Number	Power Supply (V)	No. of RS-232 Drivers/Rx	No. of Ext. Caps	Nominal Cap. Value ( $\mu F$ )	SHDN & Thre-State	Rx Active in SHDN	Data Rate (kbps)	Features
MAX220	+5	2/2	4	0.1	No	—	120	Ultra-low-power, industry-standard pinout
MAX222	+5	2/2	4	0.1	Yes	—	200	Low-power shutdown
MAX223 (MAX213)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	Yes	✓	120	MAX241 and receivers active in shutdown
MAX225	+5	5/5	0	—	Yes	✓	120	Available in SO
MAX230 (MAX200)	+5	5/0	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	5 drivers with shutdown
MAX231 (MAX201)	+5 and +7.5 to +13.2	2/2	2	1.0 (0.1)	No	—	120	Standard +5/+12V or battery supplies; same functions as MAX232
MAX232 (MAX202)	+5	2/2	4	1.0 (0.1)	No	—	120 (64)	Industry standard
MAX232A	+5	2/2	4	0.1	No	—	200	Higher slew rate, small caps
MAX233 (MAX203)	+5	2/2	0	—	No	—	120	No external caps
MAX233A	+5	2/2	0	—	No	—	200	No external caps, high slew rate
MAX234 (MAX204)	+5	4/0	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Replaces 1488
MAX235 (MAX205)	+5	5/5	0	—	Yes	—	120	No external caps
MAX236 (MAX206)	+5	4/3	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	Shutdown, three state
MAX237 (MAX207)	+5	5/3	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Complements IBM PC serial port
MAX238 (MAX208)	+5	4/4	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Replaces 1488 and 1489
MAX239 (MAX209)	+5 and +7.5 to +13.2	3/5	2	1.0 (0.1)	No	—	120	Standard +5/+12V or battery supplies; single-package solution for IBM PC serial port
MAX240	+5	5/5	4	1.0	Yes	—	120	DIP or flatpack package
MAX241 (MAX211)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	Complete IBM PC serial port
MAX242	+5	2/2	4	0.1	Yes	✓	200	Separate shutdown and enable
MAX243	+5	2/2	4	0.1	No	—	200	Open-line detection simplifies cabling
MAX244	+5	8/10	4	1.0	No	—	120	High slew rate
MAX245	+5	8/10	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, two shutdown modes
MAX246	+5	8/10	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, three shutdown modes
MAX247	+5	8/9	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, nine operating modes
MAX248	+5	8/8	4	1.0	Yes	✓	120	High slew rate, selective half-chip enables
MAX249	+5	6/10	4	1.0	Yes	✓	120	Available in quad flatpack package

**MAXIM**

Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com).

# +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

MAX220-MAX249

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS—MAX220/222/232A/233A/242/243

Supply Voltage (V <sub>CC</sub> )	-0.3V to +6V	20-Pin Plastic DIP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	..440mW
Input Voltages		16-Pin Narrow SO (derate 8.70mW/°C above +70°C)	...696mW
T <sub>IN</sub>	-0.3V to (V <sub>CC</sub> - 0.3V)	16-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C)	.....762mW
R <sub>IN</sub> (Except MAX220)	±30V	18-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C)	.....762mW
R <sub>IN</sub> (MAX220)	±25V	20-Pin Wide SO (derate 10.00mW/°C above +70°C)	.....800mW
T <sub>OUT</sub> (Except MAX220) (Note 1)	±15V	20-Pin SSOP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	.....640mW
T <sub>OUT</sub> (MAX220)	±13.2V	16-Pin CERDIP (derate 10.00mW/°C above +70°C)	.....800mW
Output Voltages		18-Pin CERDIP (derate 10.53mW/°C above +70°C)	.....842mW
T <sub>OUT</sub>	±15V	Operating Temperature Ranges	
R <sub>OUT</sub>	-0.3V to (V <sub>CC</sub> + 0.3V)	MAX2_ _AC_ _ , MAX2_ _C_ _	.....0°C to +70°C
Driver/Receiver Output Short Circuited to GND	.....Continuous	MAX2_ _AE_ _ , MAX2_ _E_ _	.....-40°C to +85°C
Continuous Power Dissipation (T <sub>A</sub> = +70°C)		MAX2_ _AM_ _ , MAX2_ _M_ _	.....-55°C to +125°C
16-Pin Plastic DIP (derate 10.53mW/°C above +70°C)	...842mW	Storage Temperature Range	.....-65°C to +160°C
18-Pin Plastic DIP (derate 11.1mW/°C above +70°C)	...889mW	Lead Temperature (soldering, 10s)	.....+300°C

**Note 1:** Input voltage measured with T<sub>OUT</sub> in high-impedance state, SHDN or V<sub>CC</sub> = 0V.

**Note 2:** For the MAX220, V<sub>+</sub> and V<sub>-</sub> can have a maximum magnitude of 7V, but their absolute difference cannot exceed 13V.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX220/222/232A/233A/242/243

(V<sub>CC</sub> = +5V ±10%, C1-C4 = 0.1µF, MAX220, C1 = 0.047µF, C2-C4 = 0.33µF, T<sub>A</sub> = T<sub>MIN</sub> to T<sub>MAX</sub>, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
<b>RS-232 TRANSMITTERS</b>						
Output Voltage Swing	All transmitter outputs loaded with 3kΩ to GND		±5	±8		V
Input Logic Threshold Low				1.4	0.8	V
Input Logic Threshold High	All devices except MAX220		2	1.4		V
	MAX220: V <sub>CC</sub> = 5.0V		2.4			
Logic Pull-Up/Input Current	All except MAX220, normal operation			5	40	µA
	SHDN = 0V, MAX222/242, shutdown, MAX220			±0.01	±1	
Output Leakage Current	V <sub>CC</sub> = 5.5V, SHDN = 0V, V <sub>OUT</sub> = ±15V, MAX222/242			±0.01	±10	µA
	V <sub>CC</sub> = SHDN = 0V, V <sub>OUT</sub> = ±15V			±0.01	±10	
Data Rate				200	116	kbps
Transmitter Output Resistance	V <sub>CC</sub> = V <sub>+</sub> = V <sub>-</sub> = 0V, V <sub>OUT</sub> = ±2V		300	10M		Ω
Output Short-Circuit Current	V <sub>OUT</sub> = 0V		±7	±22		mA
<b>RS-232 RECEIVERS</b>						
RS-232 Input Voltage Operating Range					±30	V
RS-232 Input Threshold Low	V <sub>CC</sub> = 5V	All except MAX243 R <sub>2IN</sub>	0.8	1.3		V
		MAX243 R <sub>2IN</sub> (Note 2)	-3			
RS-232 Input Threshold High	V <sub>CC</sub> = 5V	All except MAX243 R <sub>2IN</sub>		1.8	2.4	V
		MAX243 R <sub>2IN</sub> (Note 2)		-0.5	-0.1	
RS-232 Input Hysteresis	All except MAX243, V <sub>CC</sub> = 5V, no hysteresis in shdn. MAX243		0.2	0.5	1	V
RS-232 Input Resistance			3	5	7	kΩ
TTL/CMOS Output Voltage Low	I <sub>OUT</sub> = 3.2mA			0.2	0.4	V
TTL/CMOS Output Voltage High	I <sub>OUT</sub> = -1.0mA		3.5	V <sub>CC</sub> - 0.2		V
TTL/CMOS Output Short-Circuit Current	Sourcing V <sub>OUT</sub> = GND		-2	-10		mA
	Shrinking V <sub>OUT</sub> = V <sub>CC</sub>		10	30		



## +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

**MAX220-MAX249**

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX220/222/232A/233A/242/243 (continued)

(V<sub>CC</sub> = +5V ± 10%, C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub> = 0.1μF, MAX220, C<sub>1</sub> = 0.047μF, C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> = 0.33μF, T<sub>A</sub> = T<sub>MIN</sub> to T<sub>MAX</sub>, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
TTL/CMOS Output Leakage Current	SHDN = V <sub>CC</sub> or EN = V <sub>CC</sub> (SHDN = 0V for MAX222), 0V ≤ V <sub>OUT</sub> ≤ V <sub>CC</sub>			±0.05	±10	μA
EN Input Threshold Low	MAX242			1.4	0.8	V
EN Input Threshold High	MAX242		2.0	1.4		V
Operating Supply Voltage			4.5		5.5	V
V <sub>CC</sub> Supply Current (SHDN = V <sub>CC</sub> ), Figures 5, 6, 11, 19	No load	MAX220		0.5	2	mA
		MAX222/232A/233A/242/243		4	10	
	3kΩ load both inputs	MAX220		12		
		MAX222/232A/233A/242/243		15		
Shutdown Supply Current	MAX222/242	T <sub>A</sub> = +25°C		0.1	10	μA
		T <sub>A</sub> = 0°C to +70°C		2	50	
		T <sub>A</sub> = -40°C to +85°C		2	50	
		T <sub>A</sub> = -55°C to +125°C		35	100	
SHDN Input Leakage Current	MAX222/242				±1	μA
SHDN Threshold Low	MAX222/242			1.4	0.8	V
SHDN Threshold High	MAX222/242		2.0	1.4		V
Transition Slew Rate	C <sub>L</sub> = 50pF to 2500pF, R <sub>L</sub> = 3kΩ to 7kΩ, V <sub>CC</sub> = 5V, T <sub>A</sub> = +25°C, measured from +3V to -3V or -3V to +3V	MAX222/232A/233A/242/243	6	12	30	V/μs
		MAX220	1.5	3	30	
Transmitter Propagation Delay TLL to RS-232 (Normal Operation), Figure 1	t <sub>PHLT</sub>	MAX222/232A/233A/242/243		1.3	3.5	μs
		MAX220		4	10	
	t <sub>PLHT</sub>	MAX222/232A/233A/242/243		1.5	3.5	
		MAX220		5	10	
Receiver Propagation Delay RS-232 to TLL (Normal Operation), Figure 2	t <sub>PHLR</sub>	MAX222/232A/233A/242/243		0.5	1	μs
		MAX220		0.6	3	
	t <sub>PLHR</sub>	MAX222/232A/233A/242/243		0.6	1	
		MAX220		0.8	3	
Receiver Propagation Delay RS-232 to TLL (Shutdown), Figure 2	t <sub>PHLS</sub>	MAX242		0.5	10	μs
	t <sub>PLHS</sub>	MAX242		2.5	10	
Receiver-Output Enable Time, Figure 3	t <sub>ER</sub>	MAX242		125	500	ns
Receiver-Output Disable Time, Figure 3	t <sub>DR</sub>	MAX242		160	500	ns
Transmitter-Output Enable Time (SHDN Goes High), Figure 4	t <sub>ET</sub>	MAX222/242, 0.1μF caps (includes charge-pump start-up)		250		μs
Transmitter-Output Disable Time (SHDN Goes Low), Figure 4	t <sub>DT</sub>	MAX222/242, 0.1μF caps		600		ns
Transmitter + to - Propagation Delay Difference (Normal Operation)	t <sub>PHLT</sub> - t <sub>PLHT</sub>	MAX222/232A/233A/242/243		300		ns
		MAX220		2000		
Receiver + to - Propagation Delay Difference (Normal Operation)	t <sub>PHLR</sub> - t <sub>PLHR</sub>	MAX222/232A/233A/242/243		100		ns
		MAX220		225		

**Note 3:** MAX243 R<sub>2OUT</sub> is guaranteed to be low when R<sub>2IN</sub> is ≥ 0V or is floating.

## +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

**MAX220-MAX249**

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX223/MAX230–MAX241 (continued)

(MAX223/230/232/234/236/237/238/240/241,  $V_{CC} = +5V \pm 10\%$ ; MAX233/MAX235,  $V_{CC} = 5V \pm 5\%$ ,  $C_1-C_4 = 1.0\mu F$ ; MAX231/MAX239,  $V_{CC} = 5V \pm 10\%$ ;  $V_+ = 7.5V$  to  $13.2V$ ;  $T_A = T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$ ; unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
RS-232 Input Threshold Low	$T_A = +25^\circ C$ , $V_{CC} = 5V$	Normal operation SHDN = 5V (MAX223) SHDN = 0V (MAX235/236/240/241)	0.8	1.2		V
		Shutdown (MAX223) SHDN = 0V, EN = 5V ( $R_{4IN}$ , $R_{5IN}$ )	0.6	1.5		
RS-232 Input Threshold High	$T_A = +25^\circ C$ , $V_{CC} = 5V$	Normal operation SHDN = 5V (MAX223) SHDN = 0V (MAX235/236/240/241)		1.7	2.4	V
		Shutdown (MAX223) SHDN = 0V, EN = 5V ( $R_{4IN}$ , $R_{5IN}$ )		1.5	2.4	
RS-232 Input Hysteresis	$V_{CC} = 5V$ , no hysteresis in shutdown		0.2	0.5	1.0	V
RS-232 Input Resistance	$T_A = +25^\circ C$ , $V_{CC} = 5V$		3	5	7	k $\Omega$
TTL/CMOS Output Voltage Low	$I_{OUT} = 1.6mA$ (MAX231/232/233, $I_{OUT} = 3.2mA$ )				0.4	V
TTL/CMOS Output Voltage High	$I_{OUT} = -1mA$		3.5	$V_{CC} - 0.4$		V
TTL/CMOS Output Leakage Current	$0V \leq R_{OUT} \leq V_{CC}$ ; EN = 0V (MAX223); EN = $V_{CC}$ (MAX235–241)			0.05	$\pm 10$	$\mu A$
Receiver Output Enable Time	Normal operation	MAX223		600		ns
		MAX235/236/239/240/241		400		
Receiver Output Disable Time	Normal operation	MAX223		900		ns
		MAX235/236/239/240/241		250		
Propagation Delay	RS-232 IN to TTL/CMOS OUT, $C_L = 150pF$	Normal operation		0.5	10	$\mu s$
		SHDN = 0V (MAX223)	$t_{PHLS}$	4	40	
			$t_{PLHS}$	6	40	
Transition Region Slew Rate	MAX223/MAX230/MAX234–241, $T_A = +25^\circ C$ , $V_{CC} = 5V$ , $R_L = 3k\Omega$ to $7k\Omega$ , $C_L = 50pF$ to $2500pF$ , measured from $+3V$ to $-3V$ or $-3V$ to $+3V$		3	5.1	30	V/ $\mu s$
	MAX231/MAX232/MAX233, $T_A = +25^\circ C$ , $V_{CC} = 5V$ , $R_L = 3k\Omega$ to $7k\Omega$ , $C_L = 50pF$ to $2500pF$ , measured from $+3V$ to $-3V$ or $-3V$ to $+3V$			4	30	
Transmitter Output Resistance	$V_{CC} = V_+ = V_- = 0V$ , $V_{OUT} = \pm 2V$		300			$\Omega$
Transmitter Output Short-Circuit Current			$\pm 10$			mA

# +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

**MAX220-MAX249**

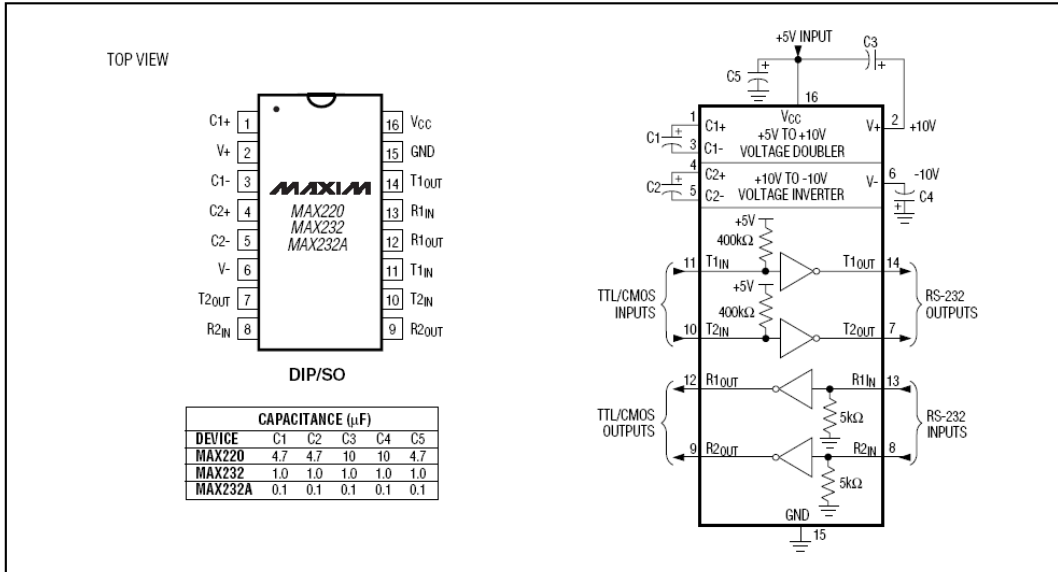


Figure 5. MAX220/MAX232/MAX232A Pin Configuration and Typical Operating Circuit

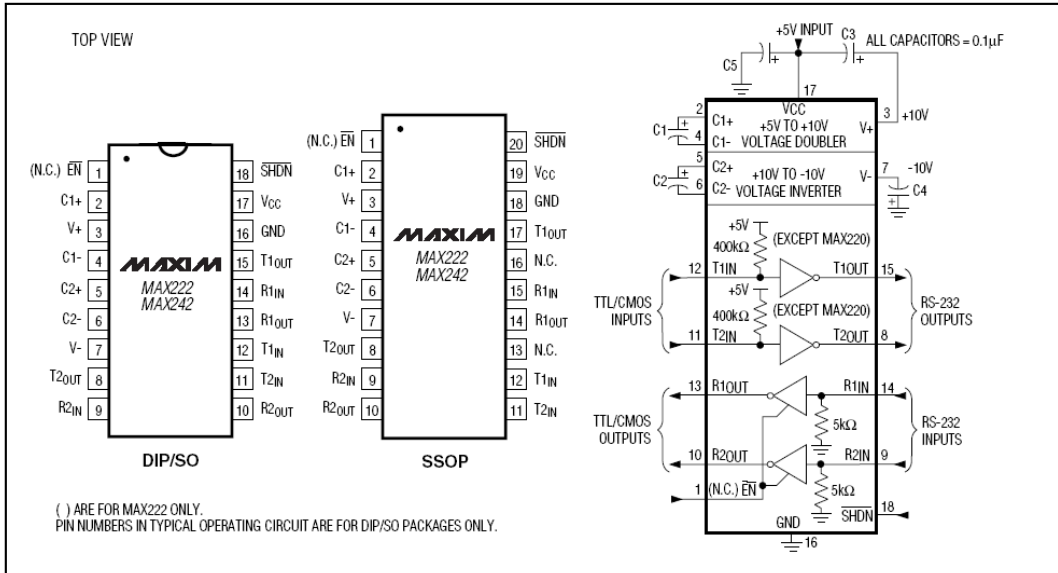


Figure 6. MAX222/MAX242 Pin Configurations and Typical Operating Circuit





## TMP35/TMP36/TMP37

### FEATURES

- Low Voltage Operation (+2.7 V to +5.5 V)
- Calibrated Directly in °C
- 10 mV/°C Scale Factor (20 mV/°C on TMP37)
- ±2°C Accuracy Over Temperature (typ)
- ±0.5°C Linearity (typ)
- Stable with Large Capacitive Loads
- Specified -40°C to +125°C, Operation to +150°C
- Less than 50 µA Quiescent Current
- Shutdown Current 0.5 µA max
- Low Self-Heating

### APPLICATIONS

- Environmental Control Systems
- Thermal Protection
- Industrial Process Control
- Fire Alarms
- Power System Monitors
- CPU Thermal Management

### PRODUCT DESCRIPTION

The TMP35, TMP36 and TMP37 are low voltage, precision centigrade temperature sensors. They provide a voltage output that is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The TMP35/TMP36/TMP37 do not require any external calibration to provide typical accuracies of ±1°C at +25°C and ±2°C over the -40°C to +125°C temperature range.

The low output impedance of the TMP35/TMP36/TMP37, and its linear output and precise calibration simplify interfacing to temperature control circuitry and A/D converters. All three devices are intended for single-supply operation from 2.7 V to 5.5 V maximum. Supply current runs well below 50 µA providing very low self-heating—less than 0.1°C in still air. In addition, a shutdown function is provided to cut supply current to less than 0.5 µA.

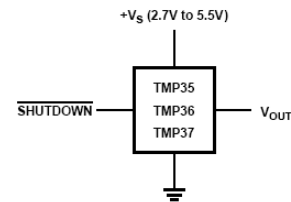
The TMP35 is functionally compatible with the LM35/LM45 and provides a 250 mV output at +25°C. The TMP35 reads temperatures from +10°C to +125°C. The TMP36 is specified from -40°C to +125°C, provides a 750 mV output at +25°C and operates to +125°C from a single 2.7 V supply. The TMP36 is functionally compatible with the LM50. Both the TMP35 and TMP36 have an output scale factor of +10 mV/°C. The TMP37 is intended for applications over the range +5°C to +100°C, and provides an output scale factor of 20 mV/°C. The TMP37 provides a 500 mV output at +25°C. Operation extends to +150°C with reduced accuracy for all devices when operating from a 5 V supply.

The TMP35/TMP36/TMP37 are all available in low cost 3-pin TO-92, and SO-8 and 5-pin SOT-23 surface mount packages.

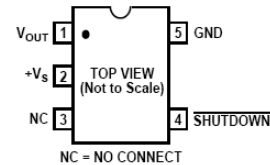
### REV. A

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

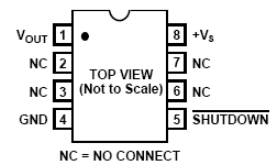
### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



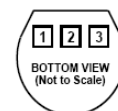
### PACKAGE TYPES AVAILABLE RT-5 (SOT-23)



### SO-8



### TO-92



PIN 1 - +V<sub>S</sub>, PIN 2 - V<sub>OUT</sub>, PIN 3 - GND

# TMP35/TMP36/TMP37F/G—SPECIFICATIONS<sup>1</sup> ( $V_S = +2.7\text{ V to }+5.5\text{ V}$ , $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>ACCURACY</b>						
TMP35/TMP36/TMP37F		$T_A = +25^\circ\text{C}$		$\pm 1$	$\pm 2$	$^\circ\text{C}$
TMP35/TMP36/TMP37G		$T_A = +25^\circ\text{C}$		$\pm 1$	$\pm 3$	$^\circ\text{C}$
TMP35/TMP36/TMP37F		Over Rated Temperature		$\pm 2$	$\pm 3$	$^\circ\text{C}$
TMP35/TMP36/TMP37G		Over Rated Temperature		$\pm 2$	$\pm 4$	$^\circ\text{C}$
Scale Factor, TMP35		$+10^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$		+10	+9.8/+10.2	mV/ $^\circ\text{C}$
Scale Factor, TMP36		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$		+10	+9.8/+10.2	mV/ $^\circ\text{C}$
Scale Factor, TMP37		$+5^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		+20	+19.6/+20.4	mV/ $^\circ\text{C}$
		$+5^\circ\text{C} \leq T_A \leq +100^\circ\text{C}$		+20	+19.6/+20.4	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation		$3.0\text{ V} \leq +V_S \leq 5.5\text{ V}$		1	20	$\text{m}^\circ\text{C}/\mu\text{A}$
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$0\ \mu\text{A} \leq I_L \leq 50\ \mu\text{A}$		30	100	$\text{m}^\circ\text{C}/\text{V}$
	PSRR	$T_A = +25^\circ\text{C}$		50		$\text{m}^\circ\text{C}/\text{V}$
		$3.0\text{ V} \leq +V_S \leq 5.5\text{ V}$		0.5		$^\circ\text{C}$
Linearity				0.5		$^\circ\text{C}$
Long-Term Stability		$T_A = +150^\circ\text{C}$ for 1 kHrs		0.4		$^\circ\text{C}$
<b>SHUTDOWN</b>						
Logic High Input Voltage	$V_{IH}$	$V_S = 2.7\text{ V}$	1.8			V
Logic Low Input Voltage	$V_{IL}$	$V_S = 5.5\text{ V}$			400	mV
<b>OUTPUT</b>						
TMP35 Output Voltage		$T_A = +25^\circ\text{C}$		250		mV
TMP36 Output Voltage		$T_A = +25^\circ\text{C}$		750		mV
TMP37 Output Voltage		$T_A = +25^\circ\text{C}$		500		mV
Output Voltage Range			100		2000	mV
Output Load Current	$I_L$		0		50	$\mu\text{A}$
Short-Circuit Current	$I_{SC}$	Note 2			250	$\mu\text{A}$
Capacitive Load Driving	$C_L$	No Oscillations <sup>2</sup>	1000	10000		pF
Device Turn-On Time		Output within $\pm 1^\circ\text{C}$		0.5	1	ms
		$100\text{ k}\Omega    100\text{ pF Load}^2$				
<b>POWER SUPPLY</b>						
Supply Range	$+V_S$		2.7		5.5	V
Supply Current	$I_{SY(ON)}$	Unloaded			50	$\mu\text{A}$
Supply Current (Shutdown)	$I_{SY(OFF)}$	Unloaded		0.01	0.5	$\mu\text{A}$

## NOTES

<sup>1</sup>Does not consider errors caused by self-heating.

<sup>2</sup>Guaranteed but not tested.

Specifications subject to change without notice.

## TMP35/TMP36/TMP37

### WAFER TEST LIMITS ( $V_S = +5\text{ V}$ , $\text{GND} = 0\text{ V}$ , $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>ACCURACY</b>						
Scale Factor Deviation		$T_A = +25^\circ\text{C}$			$\pm 2$	$^\circ\text{C}$
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$2.7\text{ V} \leq +V_S \leq 5.5\text{ V}$		30		$\text{m}^\circ\text{C}/\text{V}$
<b>SHUTDOWN</b>						
Logic High Input Voltage	$V_{IH}$	$V_S = 2.7\text{ V}$	1.8			V
Logic Low Input Voltage	$V_{IL}$	$V_S = 5.5\text{ V}$			400	mV
<b>OUTPUT</b>						
TMP35 Output Voltage		$T_A = +25^\circ\text{C}$		250		mV
TMP36 Output Voltage		$T_A = +25^\circ\text{C}$		750		mV
TMP37 Output Voltage		$T_A = +25^\circ\text{C}$		500		mV
Short-Circuit Current	$I_{SC}$	$V_S = 5.5\text{ V}$			250	$\mu\text{A}$
Device Turn-On Time		Output within $\pm 1^\circ\text{C}$ 100 k $\Omega$   100 pF Load <sup>1</sup>		0.5	1	ms
<b>POWER SUPPLY</b>						
Supply Range	V+		2.7		5.5	V
Supply Current	$I_{SY}$ (ON)	Unloaded at +5 V			50	$\mu\text{A}$
Supply Current (Shutdown)	$I_{SY}$ (OFF)	Unloaded at +5 V			0.5	$\mu\text{A}$

#### NOTES

Electrical tests are performed at wafer probe to the limits shown. Due to variations in assembly methods and normal yield loss, yield after packaging is not guaranteed for standard product dice. Consult factory to negotiate specifications based on dice lot qualification through sample lot assembly and testing.

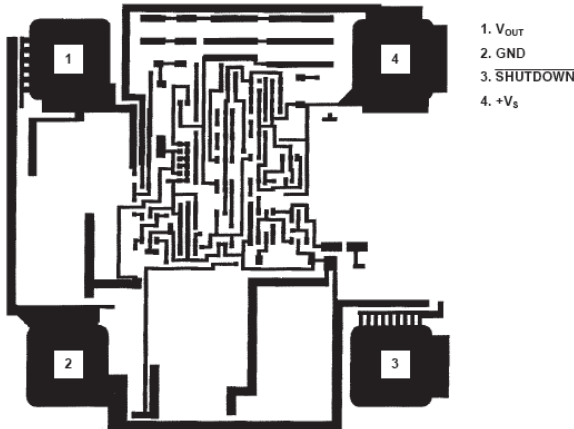
<sup>1</sup>Guaranteed but not tested.

#### DICE CHARACTERISTICS

Die Size  $0.027 \times 0.030$  inch, 810 sq. mils  
( $0.685 \times 0.762$  mm, 0.522 sq. mm)

TRANSISTOR COUNT: 25

Substrate is connected to  $+V_S$



For additional DICE ordering information, refer to databook.

#### CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the TMP35/TMP36/TMP37 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.





# TMP35/TMP36/TMP37

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS\*

Supply Voltage	+7 V
Shutdown Pin	$GND \leq \overline{SHUTDOWN} \leq +V_S$
Output Pin	$GND \leq V_{OUT} \leq +V_S$
Operating Temperature Range	-55°C to +150°C
Dice Junction Temperature	+175°C
Storage Temperature Range	-65°C to +160°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	+300°C

### \*CAUTION

- Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation at or above this specification is not implied. Exposure to the above maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.
- Digital inputs are protected; however, permanent damage may occur on unprotected units from high-energy electrostatic fields. Keep units in conductive foam or packaging at all times until ready to use. Use proper antistatic handling procedures.
- Remove power before inserting or removing units from their sockets.

Package Type	$\theta_{JA}$	$\theta_{JC}$	Units
TO-92 (T9 Suffix)	162	120	°C/W
SO-8 (S Suffix)	158	43	°C/W
SOT-23 (RT Suffix)	300	180	°C/W

$\theta_{JA}$  is specified for device in socket (worst case conditions).

## ORDERING GUIDE

Model	Accuracy at 25°C (°C max)	Linear Operating Temperature Range	Package Options <sup>1</sup>
TMP35FT9	±2.0	+10°C to +125°C	TO-92
TMP35GT9	±3.0	+10°C to +125°C	TO-92
TMP35FS	±2.0	+10°C to +125°C	SO-8
TMP35GS	±3.0	+10°C to +125°C	SO-8
TMP35GRT <sup>2</sup>	±3.0	+10°C to +125°C	RT-5
TMP36FT9	±2.0	-40°C to +125°C	TO-92
TMP36GT9	±3.0	-40°C to +125°C	TO-92
TMP36FS	±2.0	-40°C to +125°C	SO-8
TMP36GS	±3.0	-40°C to +125°C	SO-8
TMP36GRT <sup>2</sup>	±3.0	-40°C to +125°C	RT-5
TMP37FT9	±2.0	+5°C to +100°C	TO-92
TMP37GT9	±3.0	+5°C to +100°C	TO-92
TMP37FS	±2.0	+5°C to +100°C	SO-8
TMP37GS	±3.0	+5°C to +100°C	SO-8
TMP37GRT <sup>2</sup>	±3.0	+5°C to +100°C	RT-5

### NOTES

<sup>1</sup>SO = Small Outline; RT = Plastic Surface Mount; TO = Plastic.

<sup>2</sup>Consult factory for availability.

## FUNCTIONAL DESCRIPTION

An equivalent circuit for the TMP3x family of micropower, centigrade temperature sensors is shown in Figure 1. At the heart of the temperature sensor is a bandgap core, which is comprised of transistors Q1 and Q2, biased by Q3 to approximately 8 μA. The bandgap core operates both Q1 and Q2 at the same collector current level; however, since the emitter area of Q1 is 10 times that of Q2, Q1's  $V_{BE}$  and Q2's  $V_{BE}$  are not equal by the following relationship:

$$\Delta V_{BE} = V_T \times \ln \left( \frac{A_{E,Q1}}{A_{E,Q2}} \right)$$

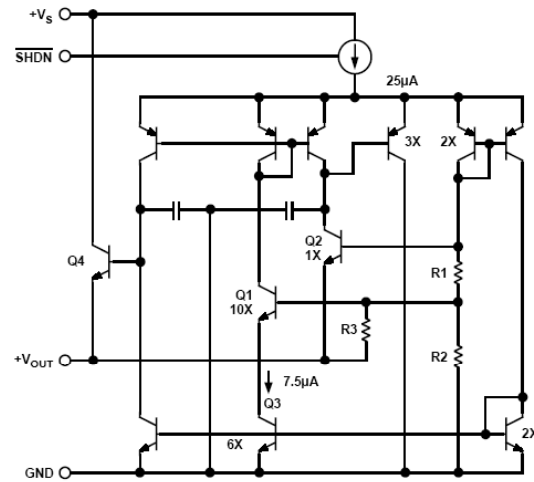


Figure 1. Temperature Sensor Simplified Equivalent Circuit

Resistors R1 and R2 are used to scale this result to produce the output voltage transfer characteristic of each temperature sensor and, simultaneously, R2 and R3 are used to scale Q1's  $V_{BE}$  as an offset term in  $V_{OUT}$ . Table I summarizes the differences between the three temperature sensors' output characteristics:

Table I. TMP3x Output Characteristics

Sensor	Offset Voltage (V)	Output Voltage Scaling (mV/°C)	Output Voltage @ 25°C
TMP35	0	10	250 mV
TMP36	0.5	10	750 mV
TMP37	0	20	500 mV

The output voltage of the temperature sensor is available at the emitter of Q4, which buffers the bandgap core and provides load current drive. Q4's current gain, working with the available base current drive from the previous stage, sets the short-circuit current limit of these devices to 250 μA.

### FEATURES

Easy to Use  
Higher Performance than Discrete Design  
Single and Dual Supply Operation  
Rail-to-Rail Output Swing  
Input Voltage Range Extends 150 mV Below Ground (Single Supply)  
Low Power, 575  $\mu$ A Max Supply Current  
Gain Set with One External Resistor  
Gain Range 1 (No Resistor) to 1,000

### HIGH ACCURACY DC PERFORMANCE

0.1% Gain Accuracy ( $G = 1$ )  
0.35% Gain Accuracy ( $G > 1$ )  
25 ppm Gain Drift ( $G = 1$ )  
200  $\mu$ V Max Input Offset Voltage (AD623A)  
2  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Max Input Offset Drift (AD623A)  
100  $\mu$ V Max Input Offset Voltage (AD623B)  
1  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Max Input Offset Drift (AD623B)  
25 nA Max Input Bias Current

### NOISE

35 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  RTI Noise @ 1 kHz ( $G = 1$ )

### EXCELLENT AC SPECIFICATIONS

90 dB Min CMRR ( $G = 10$ ); 84 dB Min CMRR ( $G = 5$ )  
(@ 60 Hz, 1K Source Imbalance)  
800 kHz Bandwidth ( $G = 1$ )  
20  $\mu$ s Settling Time to 0.01% ( $G = 10$ )

### APPLICATIONS

Low Power Medical Instrumentation  
Transducer Interface  
Thermocouple Amplifier  
Industrial Process Controls  
Difference Amplifier  
Low Power Data Acquisition

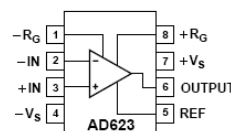
### PRODUCT DESCRIPTION

The AD623 is an integrated single supply instrumentation amplifier that delivers rail-to-rail output swing on a single supply (+3 V to +12 V supplies). The AD623 offers superior user flexibility by allowing single gain set resistor programming, and conforming to the 8-lead industry standard pinout configuration. With no external resistor, the AD623 is configured for unity gain ( $G = 1$ ) and with an external resistor, the AD623 can be programmed for gains up to 1,000.

The AD623 holds errors to a minimum by providing superior AC CMRR that increases with increasing gain. Line noise, as well as line harmonics, will be rejected since the CMRR remains constant up to 200 Hz. The AD623 has a wide input

### CONNECTION DIAGRAM

8-Lead Plastic DIP (N),  
SOIC (R) and  $\mu$ SOIC (RM) Packages



common-mode range and can amplify signals that have a common-mode voltage 150 mV below ground. Although the design of the AD623 has been optimized to operate from a single supply, the AD623 still provides superior performance when operated from a dual voltage supply ( $\pm 2.5$  V to  $\pm 6.0$  V).

Low power consumption (1.5 mW at 3 V), wide supply voltage range, and rail-to-rail output swing make the AD623 ideal for battery powered applications. The rail-to-rail output stage maximizes the dynamic range when operating from low supply voltages. The AD623 replaces discrete instrumentation amplifier designs and offers superior linearity, temperature stability and reliability in a minimum of space. Until the AD623, this level of instrumentation amplifier performance has not been achieved.

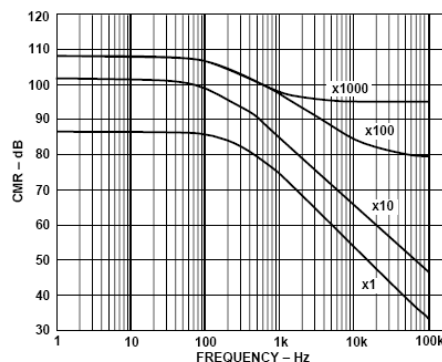


Figure 1. CMR vs. Frequency, +5  $V_S$ , 0  $V_S$

### REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

# AD623—SPECIFICATIONS

**SINGLE SUPPLY** (typical @ +25°C Single Supply,  $V_S = +5\text{ V}$ , and  $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , unless otherwise noted)

Model Specification	Conditions	AD623A			AD623ARM			AD623B			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>GAIN</b>	$G = 1 + (100\text{ k}/R_G)$	1		1000	1		1000	1		1000	
Gain Range	$G1\ V_{OUT} = 0.05\text{ V to } 3.5\text{ V}$										
Gain Error <sup>1</sup>	$G > 1\ V_{OUT} = 0.05\text{ V to } 4.5\text{ V}$										
G = 1			0.03	0.10		0.03	0.10		0.03	0.05	%
G = 10			0.10	0.35		0.10	0.35		0.10	0.35	%
G = 100			0.10	0.35		0.10	0.35		0.10	0.35	%
G = 1000			0.10	0.35		0.10	0.35		0.10	0.35	%
Nonlinearity,	$G1\ V_{OUT} = 0.05\text{ V to } 3.5\text{ V}$ $G > 1\ V_{OUT} = 0.05\text{ V to } 4.5\text{ V}$										
G = 1–1000			50			50			50		ppm
Gain vs. Temperature											
G = 1			5	10		5	10		5	10	ppm/°C
G > 1 <sup>1</sup>			50			50			50		ppm/°C
<b>VOLTAGE OFFSET</b>	Total RTI Error = $V_{OSI} + V_{OSO}/G$										
Input Offset, $V_{OSI}$			25	200		200	500		25	100	$\mu\text{V}$
Over Temperature				350			650			160	$\mu\text{V}$
Average TC			0.1	2		0.1	2		0.1	1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, $V_{OSO}$			200	1000		500	2000		200	500	$\mu\text{V}$
Over Temperature				1500			2600			1100	$\mu\text{V}$
Average TC			2.5	10		2.5	10		2.5	10	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)											
G = 1		80	100		80	100		80	100		dB
G = 10		100	120		100	120		100	120		dB
G = 100		120	140		120	140		120	140		dB
G = 1000		120	140		120	140		120	140		dB
<b>INPUT CURRENT</b>											
Input Bias Current			17	25		17	25		17	25	nA
Over Temperature				27.5			27.5			27.5	nA
Average TC			25			25			25		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current			0.25	2		0.25	2		0.25	2	nA
Over Temperature				2.5			2.5			2.5	nA
Average TC			5			5			5		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
<b>INPUT</b>											
Input Impedance											
Differential			2  2			2  2			2  2		$G\Omega  \text{pF}$
Common-Mode			2  2			2  2			2  2		$G\Omega  \text{pF}$
Input Voltage Range <sup>2</sup>	$V_S = +3\text{ V to } +12\text{ V}$	$(-V_S) - 0.15$		$(+V_S) - 1.5$	$(-V_S) - 0.15$		$(+V_S) - 1.5$	$(-V_S) - 0.15$		$(+V_S) - 1.5$	V
Common-Mode Rejection at 60 Hz with 1 k $\Omega$ Source Imbalance											
G = 1	$V_{CM} = 0\text{ V to } 3\text{ V}$	70	80		70	80		77	86		dB
G = 10	$V_{CM} = 0\text{ V to } 3\text{ V}$	90	100		90	100		94	100		dB
G = 100	$V_{CM} = 0\text{ V to } 3\text{ V}$	105	110		105	110		105	110		dB
G = 1000	$V_{CM} = 0\text{ V to } 3\text{ V}$	105	110		105	110		105	110		dB
<b>OUTPUT</b>											
Output Swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$	+0.01		$(+V_S) - 0.5$	+0.01		$(+V_S) - 0.5$	+0.01		$(+V_S) - 0.5$	V
	$R_L = 100\text{ k}\Omega$	+0.01		$(+V_S) - 0.15$	+0.01		$(+V_S) - 0.15$	+0.01		$(+V_S) - 0.15$	V
<b>DYNAMIC RESPONSE</b>											
Small Signal –3 dB Bandwidth											
G = 1			800			800			800		kHz
G = 10			100			100			100		kHz
G = 100			10			10			10		kHz
G = 1000			2			2			2		kHz
Slew Rate			0.3			0.3			0.3		V/ $\mu\text{s}$
Settling Time to 0.01%	$V_S = +5\text{ V}$										
G = 1	Step Size: 3.5 V		30			30			30		$\mu\text{s}$
G = 10	Step Size: 4 V, $V_{CM} = 1.8\text{ V}$										$\mu\text{s}$

**DUAL SUPPLIES** (typical @ +25°C Dual Supply,  $V_S = \pm 5\text{ V}$ , and  $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , unless otherwise noted)

Model Specification	Conditions	AD623A			AD623ARM			AD623B			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>GAIN</b>	$G = 1 + (100\text{ k}/R_G)$	1		1000	1		1000	1		1000	
Gain Range	$G1\ V_{OUT} = -4.8\text{ V to }3.5\text{ V}$										
Gain Error <sup>1</sup>	$G > 1\ V_{OUT} = 0.05\text{ V to }4.5\text{ V}$										
G = 1			0.03	0.10		0.03	0.10		0.03	0.05	%
G = 10			0.10	0.35		0.10	0.35		0.10	0.35	%
G = 100			0.10	0.35		0.10	0.35		0.10	0.35	%
G = 1000			0.10	0.35		0.10	0.35		0.10	0.35	%
Nonlinearity,	$G1\ V_{OUT} = -4.8\text{ V to }3.5\text{ V}$ $G > 1\ V_{OUT} = -4.8\text{ V to }4.5\text{ V}$										
G = 1–1000			50			50			50		ppm
Gain vs. Temperature											
G = 1			5	10		5	10		5	10	ppm/°C
G > 1 <sup>1</sup>			50			50			50		ppm/°C
<b>VOLTAGE OFFSET</b>	Total RTI Error = $V_{OS1} + V_{OSO}/G$										
Input Offset, $V_{OS1}$			25	200		200	500		25	100	$\mu\text{V}$
Over Temperature				350			650			160	$\mu\text{V}$
Average TC			0.1	2		0.1	2		0.1	1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, $V_{OSO}$			200	1000		500	2000		200	500	$\mu\text{V}$
Over Temperature				1500			2600			1100	$\mu\text{V}$
Average TC			2.5	10		2.5	10		2.5	10	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)											
G = 1		80	100		80	100		80	100		dB
G = 10		100	120		100	120		100	120		dB
G = 100		120	140		120	140		120	140		dB
G = 1000		120	140		120	140		120	140		dB
<b>INPUT CURRENT</b>											
Input Bias Current			17	25		17	25		17	25	nA
Over Temperature				27.5			27.5			27.5	nA
Average TC			25			25			25		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current			0.25	2		0.25	2		0.25	2	nA
Over Temperature				2.5			2.5			2.5	nA
Average TC			5			5			5		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
<b>INPUT</b>											
Input Impedance											
Differential			2  2			2  2			2  2		$\text{G}\Omega  \text{pF}$
Common-Mode			2  2			2  2			2  2		$\text{G}\Omega  \text{pF}$
Input Voltage Range <sup>2</sup>	$V_S = +2.5\text{ V to } \pm 6\text{ V}$	$(-V_S) - 0.15$		$(+V_S) - 1.5$	$(-V_S) - 0.15$		$(+V_S) - 1.5$	$(-V_S) - 0.15$		$(+V_S) - 1.5$	V
Common-Mode Rejection at 60 Hz with 1 k $\Omega$ Source Imbalance											
G = 1	$V_{CM} = +3.5\text{ V to } -5.15\text{ V}$	70	80		70	80		77	86		dB
G = 10	$V_{CM} = +3.5\text{ V to } -5.15\text{ V}$	90	100		90	100		94	100		dB
G = 100	$V_{CM} = +3.5\text{ V to } -5.15\text{ V}$	105	110		105	110		105	110		dB
G = 1000	$V_{CM} = +3.5\text{ V to } -5.15\text{ V}$	105	110		105	110		105	110		dB
<b>OUTPUT</b>											
Output Swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega, V_S = \pm 5\text{ V}$ $R_L = 100\text{ k}\Omega$	$(-V_S) + 0.2$ $(-V_S) + 0.05$		$(+V_S) - 0.5$ $(+V_S) - 0.15$	$(-V_S) + 0.2$ $(-V_S) + 0.05$		$(+V_S) - 0.5$ $(+V_S) - 0.15$	$(-V_S) + 0.2$ $(-V_S) + 0.05$		$(+V_S) - 0.5$ $(+V_S) - 0.15$	V
<b>DYNAMIC RESPONSE</b>											
Small Signal –3 dB Bandwidth											
G = 1			800			800			800		kHz
G = 10			100			100			100		kHz
G = 100			10			10			10		kHz
G = 1000			2			2			2		kHz
Slew Rate			0.3			0.3			0.3		$\text{V}/\mu\text{s}$
Settling Time to 0.01%	$V_S = \pm 5\text{ V}, 5\text{ V Step}$										
G = 1			30			30			30		$\mu\text{s}$
G = 10			20			20			20		$\mu\text{s}$

# AD623—SPECIFICATIONS

## BOTH DUAL AND SINGLE SUPPLIES

Model Specification	Conditions	AD623A			AD623ARM			AD623B			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>NOISE</b>											
Voltage Noise, 1 kHz	Total RTI Noise = $\sqrt{(e_{ni})^2 + (e_{no}/G)^2}$										nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Input, Voltage Noise, $e_{ni}$		35			35			35			
Output, Voltage Noise, $e_{no}$	50			50			50				
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz	$f = 1 \text{ kHz}$	3.0			3.0			3.0			$\mu\text{V p-p}$
$G = 1$		1.5			1.5			1.5			$\mu\text{V p-p}$
$G = 1000$		100			100			100			fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Current Noise		1.5			1.5			1.5			pA p-p
<b>REFERENCE INPUT</b>											
$R_{IN}$	$V_{IN+}, V_{REF} = 0$	100	$\pm 20\%$		100	$\pm 20\%$		100	$\pm 20\%$		k $\Omega$
$I_{IN}$		+50	+60		+50	+60		+50	+60		$\mu\text{A}$
Voltage Range		$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		V
Gain to Output		$1 \pm 0.0002$			$1 \pm 0.0002$			$1 \pm 0.0002$			V
<b>POWER SUPPLY</b>											
Operating Range	Dual Supply	$\pm 2.5$	$\pm 6$		$\pm 2.5$	$\pm 6$		$\pm 2.5$	$\pm 6$		V
	Single Supply	+2.7	+12		+2.7	+12		+2.7	+12		V
Quiescent Current	Dual Supply	375	550		375	550		375	550		$\mu\text{A}$
	Single Supply	305	480		305	480		305	480		$\mu\text{A}$
Over Temperature			625			625			625		$\mu\text{A}$
<b>TEMPERATURE RANGE</b>											
For Specified Performance		-40 to +85			-40 to +85			-40 to +85			$^{\circ}\text{C}$

### NOTES

<sup>1</sup>Does not include effects of external resistor  $R_G$ .

<sup>2</sup>One input grounded.  $G = 1$ .

Specifications subject to change without notice.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>1</sup>

Supply Voltage	$\pm 6 \text{ V}$
Internal Power Dissipation <sup>2</sup>	650 mW
Differential Input Voltage	$\pm 6 \text{ V}$
Output Short Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range	
(N, R, RM)	$-65^{\circ}\text{C}$ to $+125^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature Range	
(A)	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$

### Lead Temperature Range

(Soldering 10 seconds)  $+300^{\circ}\text{C}$

### NOTES

<sup>1</sup>Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

<sup>2</sup>Specification is for device in free air:

8-Lead Plastic DIP Package:  $\theta_{JA} = 95^{\circ}\text{C}/\text{W}$

8-Lead SOIC Package:  $\theta_{JA} = 155^{\circ}\text{C}/\text{W}$

8-Lead  $\mu\text{SOIC}$  Package:  $\theta_{JA} = 200^{\circ}\text{C}/\text{W}$

### ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Package Description	Package Option	Brand Code
AD623AN	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	8-Lead Plastic DIP	N-8	J0A
AD623AR	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	8-Lead SOIC	SO-8	
AD623ARM	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	8-Lead $\mu\text{SOIC}$	RM-8	
AD623AR-REEL	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	13" Tape and Reel	SO-8	J0A
AD623AR-REEL7	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	7" Tape and Reel	SO-8	
AD623ARM-REEL	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	13" Tape and Reel	RM-8	
AD623ARM-REEL7	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	7" Tape and Reel	RM-8	J0A
AD623BN	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	8-Lead Plastic DIP	N-8	J0A
AD623BR	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	8-Lead SOIC	SO-8	
AD623BR-REEL	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	13" Tape and Reel	SO-8	
AD623BR-REEL7	$-40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	7" Tape and Reel	SO-8	

### ESD SUSCEPTIBILITY

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 volts, which readily accumulate on the human body and on test equipment, can discharge without detection. Although the AD623 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may still occur on these devices if they are subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid any performance degradation or loss of functionality.





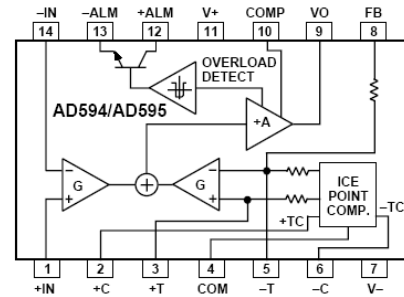
# Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

## AD594/AD595

### FEATURES

- Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples
- Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs
- Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C
- Built-In Ice Point Compensation
- Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V
- Low Power: <1 mW typical
- Thermocouple Failure Alarm
- Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy
- Setpoint Mode Operation
- Self-Contained Celsius Thermometer Operation
- High Impedance Differential Input
- Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



### PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 µA, but is also capable of delivering in excess of ±5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

### REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

# AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$ , Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATING</b>													
+ $V_S$ to - $V_S$			36			36			36			36	Volts
Common-Mode Input Voltage	- $V_S - 0.15$		$+V_S$	- $V_S - 0.15$		$+V_S$	- $V_S - 0.15$		$+V_S$	- $V_S - 0.15$		$+V_S$	Volts
Differential Input Voltage			$+V_S$			$+V_S$			$+V_S$			$+V_S$	Volts
Alarm Voltages													
+ALM	- $V_S$		$-V_S + 36$	- $V_S$		$-V_S + 36$	- $V_S$		$-V_S + 36$	- $V_S$		$-V_S + 36$	Volts
-ALM	- $V_S$		$+V_S$	- $V_S$		$+V_S$	- $V_S$		$+V_S$	- $V_S$		$+V_S$	Volts
Operating Temperature Range	-55		+125	-55		+125	-55		+125	-55		+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
<b>TEMPERATURE MEASUREMENT</b> (Specified Temperature Range 0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C <sup>1</sup>			±3			±1			±3			±1	°C
Stability vs. Temperature <sup>2</sup>			±0.05			±0.025			±0.05			±0.025	°C/°C
Gain Error			±1.5			±0.75			±1.5			±0.75	%
Nominal Transfer Function			10			10			10			10	mV/°C
<b>AMPLIFIER CHARACTERISTICS</b>													
Closed Loop Gain <sup>3</sup>		193.4			193.4			247.3			247.3		
Input Offset Voltage		(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C		μV
Input Bias Current		0.1			0.1			0.1			0.1		μA
Differential Input Range	-10		+50	-10		+50	-10		+50	-10		+50	mV
Common-Mode Range	- $V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	- $V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	- $V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	- $V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	Volts
Common-Mode Sensitivity – RTO			10			10			10			10	mV/V
Power Supply Sensitivity – RTO			10			10			10			10	mV/V
Output Voltage Range													
Dual Supply	- $V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	- $V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	- $V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	- $V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	Volts
Single Supply	0		$+V_S - 2$	0		$-V_S - 2$	0		$+V_S + 2$	0		$+V_S - 2$	Volts
Usable Output Current <sup>4</sup>		±5			±5			±5			±5		mA
3 dB Bandwidth		15			15			15			15		kHz
<b>ALARM CHARACTERISTICS</b>													
$V_{CE(SAT)}$ at 2 mA		0.3			0.3			0.3			0.3		Volts
Leakage Current			±1			±1			±1			±1	μA max
Operating Voltage at -ALM			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$	Volts
Short Circuit Current		20			20			20			20		mA
<b>POWER REQUIREMENTS</b>													
Specified Performance		$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$		Volts
Operating <sup>5</sup>		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$		Volts
Quiescent Current (No Load)													
+ $V_S$		160	300		160	300		160	300		160	300	μA
- $V_S$		100			100			100			100		μA
<b>PACKAGE OPTION</b>													
TO-116 (D-14)		AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD		
Cerdip (Q-14)		AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ		

## NOTES

<sup>1</sup>Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.

<sup>2</sup>Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

<sup>3</sup>Pin 8 shorted to Pin 9.

<sup>4</sup>Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.

<sup>5</sup>- $V_S$  must not exceed -16.5 V.

Specifications shown in boldface are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in boldface are tested on all production units. Specifications subject to change without notice.

## INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN FE-CUNI

Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C, V<sub>S</sub> = -5 V, +15 V)

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-0.995	-189	-0.777	-189
-10	-0.501	-94	-0.392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	0.507	101	0.397	101
20	1.019	200	0.798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	42.283	8181	31.214	7722
760	-	-	31.629	7825
780	-	-	32.455	8029
800	-	-	33.277	8232
820	-	-	34.095	8434
840	-	-	34.909	8636
860	-	-	35.718	8836
880	-	-	36.524	9035
900	-	-	37.325	9233
920	-	-	38.122	9430
940	-	-	38.915	9626
960	-	-	39.703	9821
980	-	-	40.488	10015
1000	-	-	41.269	10209
1020	-	-	42.045	10400
1040	-	-	42.817	10591
1060	-	-	43.585	10781
1080	-	-	44.339	10970
1100	-	-	45.108	11158
1120	-	-	45.863	11345
1140	-	-	46.612	11530
1160	-	-	47.356	11714
1180	-	-	48.095	11897
1200	-	-	48.828	12078
1220	-	-	49.555	12258
1240	-	-	50.276	12436
1250	-	-	50.633	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NiCr-Ni thermocouples are composed

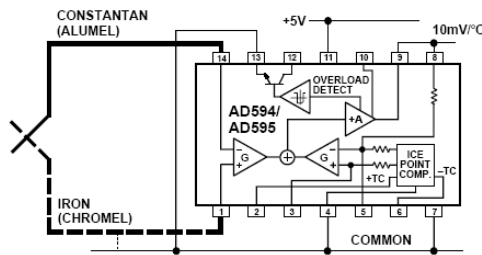


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

**SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS**

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.



## AD594/AD595

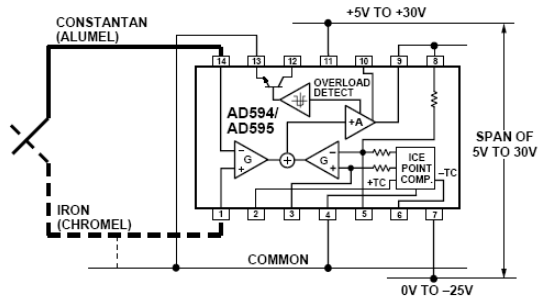


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

### THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

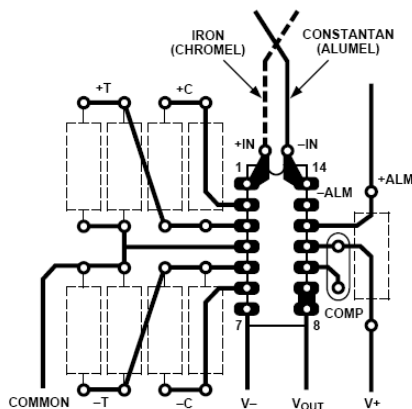


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

### FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

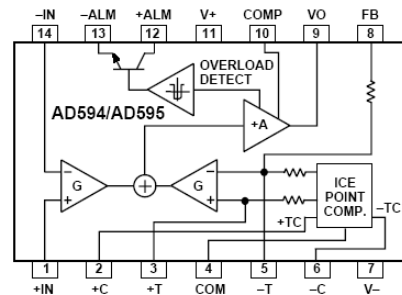


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

The AD594/AD595 also includes an input open circuit detector that switches on an alarm transistor. This transistor is actually a current-limited output buffer, but can be used up to the limit as a switch transistor for either pull-up or pull-down operation of external alarms.

The ice point compensation network has voltages available with positive and negative temperature coefficients. These voltages may be used with external resistors to modify the ice point compensation and recalibrate the AD594/AD595 as described in the next column.

The feedback resistor is separately pinned out so that its value can be padded with a series resistor, or replaced with an external resistor between Pins 5 and 9. External availability of the feedback resistor allows gain to be adjusted, and also permits the AD594/AD595 to operate in a switching mode for setpoint operation.

**CAUTIONS:**

The temperature compensation terminals (+C and -C) at Pins 2 and 6 are provided to supply small calibration currents only. The AD594/AD595 may be permanently damaged if they are grounded or connected to a low impedance.

The AD594/AD595 is internally frequency compensated for feedback ratios (corresponding to normal signal gain) of 75 or more. If a lower gain is desired, additional frequency compensation should be added in the form of a 300 pF capacitor from Pin 10 to the output at Pin 9. As shown in Figure 5 an additional 0.01 μF capacitor between Pins 10 and 11 is recommended.

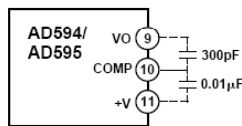


Figure 5. Low Gain Frequency Compensation

**RECALIBRATION PRINCIPLES AND LIMITATIONS**

The ice point compensation network of the AD594/AD595 produces a differential signal which is zero at 0°C and corresponds to the output of an ice referenced thermocouple at the temperature of the chip. The positive TC output of the circuit is proportional to Kelvin temperature and appears as a voltage at +T. It is possible to decrease this signal by loading it with a resistor from +T to COM, or increase it with a pull-up resistor from +T to the larger positive TC voltage at +C. Note that adjustments to +T should be made by measuring the voltage which tracks it at -T. To avoid destabilizing the feedback amplifier the measuring instrument should be isolated by a few thousand ohms in series with the lead connected to -T.

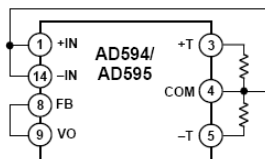


Figure 6. Decreased Sensitivity Adjustment

Changing the positive TC half of the differential output of the compensation scheme shifts the zero point away from 0°C. The zero can be restored by adjusting the current flow into the negative input of the feedback amplifier, the -T pin. A current into

this terminal can be produced with a resistor between -C and -T to balance an increase in +T, or a resistor from -T to COM to offset a decrease in +T.

If the compensation is adjusted substantially to accommodate a different thermocouple type, its effect on the final output voltage will increase or decrease in proportion. To restore the nominal output to 10 mV/°C the gain may be adjusted to match the new compensation and thermocouple input characteristics. When reducing the compensation the resistance between -T and COM automatically increases the gain to within 0.5% of the correct value. If a smaller gain is required, however, the nominal 47 kΩ internal feedback resistor can be paralleled or replaced with an external resistor.

Fine calibration adjustments will require temperature response measurements of individual devices to assure accuracy. Major reconfigurations for other thermocouple types can be achieved without seriously compromising initial calibration accuracy, so long as the procedure is done at a fixed temperature using the factory calibration as a reference. It should be noted that intermediate recalibration conditions may require the use of a negative supply.

**EXAMPLE: TYPE E RECALIBRATION—AD594/AD595**

Both the AD594 and AD595 can be configured to condition the output of a type E (chromel-constantan) thermocouple. Temperature characteristics of type E thermocouples differ less from type J, than from type K, therefore the AD594 is preferred for recalibration.

While maintaining the device at a constant temperature follow the recalibration steps given here. First, measure the device temperature by tying both inputs to common (or a selected common-mode potential) and connecting FB to VO. The AD594 is now in the stand alone Celsius thermometer mode. For this example assume the ambient is 24°C and the initial output VO is 240 mV. Check the output at VO to verify that it corresponds to the temperature of the device.

Next, measure the voltage -T at Pin 5 with a high impedance DVM (capacitance should be isolated by a few thousand ohms of resistance at the measured terminals). At 24°C the -T voltage will be about 8.3 mV. To adjust the compensation of an AD594 to a type E thermocouple a resistor, R1, should be connected between +T and +C, Pins 2 and 3, to raise the voltage at -T by the ratio of thermocouple sensitivities. The ratio for converting a type J device to a type E characteristic is:

$$r(AD594) = (60.9 \mu V/^\circ C) / (51.7 \mu V/^\circ C) = 1.18$$

Thus, multiply the initial voltage measured at -T by r and experimentally determine the R1 value required to raise -T to that level. For the example the new -T voltage should be about 9.8 mV. The resistance value should be approximately 1.8 kΩ.

The zero differential point must now be shifted back to 0°C. This is accomplished by multiplying the original output voltage VO by r and adjusting the measured output voltage to this value by experimentally adding a resistor, R2, between -C and -T, Pins 5 and 6. The target output value in this case should be about 283 mV. The resistance value of R2 should be approximately 240 kΩ.

Finally, the gain must be recalibrated such that the output VO indicates the device's temperature once again. Do this by adding a third resistor, R3, between FB and -T, Pins 8 and 5. VO should now be back to the initial 240 mV reading. The resistance value

## AD594/AD595

of R3 should be approximately 280 k $\Omega$ . The final connection diagram is shown in Figure 7. An approximate verification of the effectiveness of recalibration is to measure the differential gain to the output. For type E it should be 164.2.

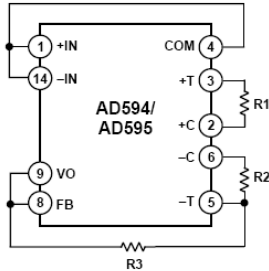


Figure 7. Type E Recalibration

When implementing a similar recalibration procedure for the AD595 the values for R1, R2, R3 and r will be approximately 650  $\Omega$ , 84 k $\Omega$ , 93 k $\Omega$  and 1.51, respectively. Power consumption will increase by about 50% when using the AD595 with type E inputs.

Note that during this procedure it is crucial to maintain the AD594/AD595 at a stable temperature because it is used as the temperature reference. Contact with fingers or any tools not at ambient temperature will quickly produce errors. Radiational heating from a change in lighting or approach of a soldering iron must also be guarded against.

### USING TYPE T THERMOCOUPLES WITH THE AD595

Because of the similarity of thermal EMFs in the 0°C to +50°C range between type K and type T thermocouples, the AD595 can be directly used with both types of inputs. Within this ambient temperature range the AD595 should exhibit no more than an additional 0.2°C output calibration error when used with type T inputs. The error arises because the ice point compensator is trimmed to type K characteristics at 25°C. To calculate the AD595 output values over the recommended -200°C to +350°C range for type T thermocouples, simply use the ANSI thermocouple voltages referred to 0°C and the output equation given on page 2 for the AD595. Because of the relatively large nonlinearities associated with type T thermocouples the output will deviate widely from the nominal 10 mV/°C. However, cold junction compensation over the rated 0°C to +50°C ambient will remain accurate.

### STABILITY OVER TEMPERATURE

Each AD594/AD595 is tested for error over temperature with the measuring thermocouple at 0°C. The combined effects of cold junction compensation error, amplifier offset drift and gain error determine the stability of the AD594/AD595 output over the rated ambient temperature range. Figure 8 shows an AD594/AD595 drift error envelope. The slope of this figure has units of °C/°C.

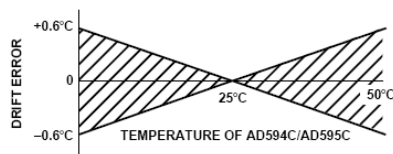


Figure 8. Drift Error vs. Temperature

### THERMAL ENVIRONMENT EFFECTS

The inherent low power dissipation of the AD594/AD595 and the low thermal resistance of the package make self-heating errors almost negligible. For example, in still air the chip to ambient thermal resistance is about 80°C/watt (for the D package). At the nominal dissipation of 800  $\mu$ W the self-heating in free air is less than 0.065°C. Submerged in fluorinert liquid (unstirred) the thermal resistance is about 40°C/watt, resulting in a self-heating error of about 0.032°C.

### SETPOINT CONTROLLER

The AD594/AD595 can readily be connected as a setpoint controller as shown in Figure 9.

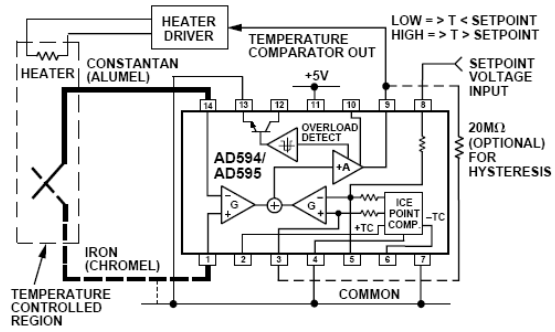


Figure 9. Setpoint Controller

The thermocouple is used to sense the unknown temperature and provide a thermal EMF to the input of the AD594/AD595. The signal is cold junction compensated, amplified to 10 mV/°C and compared to an external setpoint voltage applied by the user to the feedback at Pin 8. Table I lists the correspondence between setpoint voltage and temperature, accounting for the nonlinearity of the measurement thermocouple. If the setpoint temperature range is within the operating range (-55°C to +125°C) of the AD594/AD595, the chip can be used as the transducer for the circuit by shorting the inputs together and utilizing the nominal calibration of 10 mV/°C. This is the centigrade thermometer configuration as shown in Figure 13.

In operation if the setpoint voltage is above the voltage corresponding to the temperature being measured the output swings low to approximately zero volts. Conversely, when the temperature rises above the setpoint voltage the output switches to the positive limit of about 4 volts with a +5 V supply. Figure 9 shows the setpoint comparator configuration complete with a heater element driver circuit being controlled by the AD594/AD595 toggled output. Hysteresis can be introduced by injecting a current into the positive input of the feedback amplifier when the output is toggled high. With an AD594 about 200 nA into the +T terminal provides 1°C of hysteresis. When using a single 5 V supply with an AD594, a 20 M $\Omega$  resistor from V<sub>O</sub> to +T will supply the 200 nA of current when the output is forced high (about 4 V). To widen the hysteresis band decrease the resistance connected from V<sub>O</sub> to +T.

## HyperAmp® 2.4 GHz 802.11b and 802.11g (b/g) Compatible Outdoor Bi-Directional WiFi Amplifiers with RP-TNC Connectors and Active Power Control

### Features

- Includes 12VDC Power Supply, DC Injector and Mast-Mount Hardware
- Receive Bandpass Filter
- Standard Models: 250 mw to 1 Watt
- IEEE 802.11g (b/g) and 802.11b Only Compatible (see chart below)
- Streaming Media Ready Models (see chart below)
- Cast Aluminum Construction
- RP-TNC connectors
- Durable UV-Stable Finish
- Transmit and Receive LEDs
- 1 Year Limited Warranty



Outdoor "G" Model (Top)  
Outdoor "GX" Model (Bottom)

### Models

#### Availability:

In the US these amplifiers are FCC certified with and offered for sale only for use with XI325 PC Card models listed in the table below. Refer to product manuals for full details.

Outdoor Models (RP-TNC Connectors)	Max Output	802.11b	802.11g	Streaming Media Ready	FCC Certified Radio Models
HA2401RTG-250	250 mW	✓	✓		H-PC325-G
HA2401RTG-500	500 mW	✓			H-PC325-G
HA2401RTG-1000	1 Watt	✓			H-PC325-G
HA2401RTGX-1000	1 Watt	✓	✓	✓	H-PC325-GX

### Description

HyperAmp® HA2401RTG amplifiers are compatible with 802.11g (b/g) and 802.11b only wireless LAN equipment (see chart above for model compatibility). Hyperlink's Active Power Control circuit automatically adjusts the amplifier's gain to provide a constant output power regardless of cable length.

The HyperAmp® HA2401RTG series improves range by delivering full transmit power directly at the antenna where it is most effective. In addition the unit's receive gain compensates for cable losses. The unit can be configured to deliver the full transmit power with as little as 1 mW of input power, permitting cable runs of several hundred feet with no degradation in operating range.

### Streaming Media Ready

WiFi components used in a Streaming Video or Audio system work harder than ones carrying Data only. They are turned on for extended periods of time without the chance to cool off. Microwave devices are very sensitive to the heat generated from operating at high duty cycles. Most amplifiers, or for that matter many Radios, cannot pass Streaming Media content for extended periods of time without overheating. Some products were designed for Data only use and have no method of heatsinking. If you use them in a Streaming Media system, those products will self-destruct or have their lifespan diminished. It would be the equivalent removing the Heatsink or Fans from your PC.

Hyperlink Technologies "Streaming Media Ready" amplifiers (see chart above for models) were designed from the start to survive the extreme conditions that Streaming Media imposes on an amplifier. Using proprietary heatsinking techniques, Hyperlink's Streaming Media amplifiers will remain at a safe operating temperatures for the most demanding Streaming Media applications, without the need for cumbersome heatsink plates, fins or fans.

### Outdoor Models

The "G" and "GX" models feature rugged cast aluminum weatherproof construction to ensure years of reliable operation in the harshest environments. The integral mast mount gives this amplifier superior strength as well as simplifies installation. Included with the outdoor models, the DC Power Injector provides power to the HyperAmp® through the antenna cable, simplifying installation. Current-sensing circuits provide remote amplifier diagnostic LEDs. In addition, this unit provides effective lightning protection with multi-strike capability.

**DC Injector**



**Integral Mast-Mount**



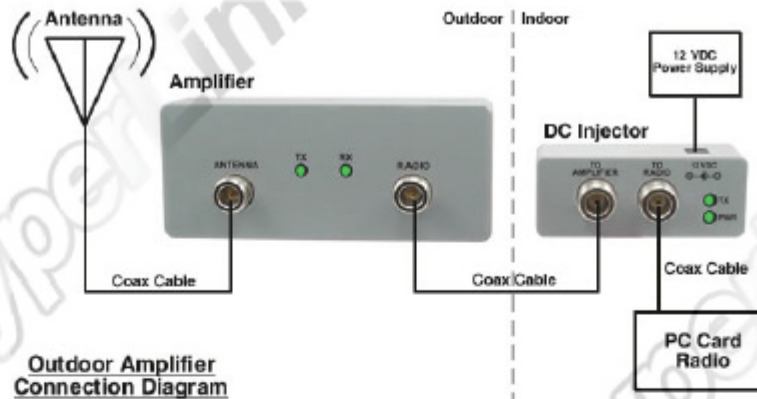
### Power Supply

The power supply included with the amplifier is rated at 100-240 VAC @ 50/60 Hz allowing it to be used in the US as well as in the EU when used with the optional PSX-EU2 Plug converter (US NEMA 6-15R Flat Blades to EU 4/4.8 mm round pins). See Accessories Below for PSX-EU2 Plug Converter.

### Product Availability







In the US these amplifiers are FCC certified with and offered for sale only for use with XI325 PC Card models listed in the table above. Refer to product manuals for full details.

### Connection Diagram



**Outdoor Amplifier  
Connection Diagram**

### Specifications

Outdoor Amp Models	Transmit Power	Receive Gain	802.11b	802.11g	Dimensions-Weight
HA2401RTG-250	250 mW (24 dBm)	15 dB nom.			4.5 x 2.5 x 1.3 (inches) 117 x 64 x 33 (mm)
HA2401RTG-500	500 mW (27 dBm)	15 dB nom.			.68 lbs. (.30 Kg)
HA2401RTG-1000	1 Watt (30 dBm)	15 dB nom.			
HA2401RTGX-1000	1 Watt (30 dBm)	20 dB nom.			5.9 x 2.5 x 1.3 (inches) 150 x 64 x 33 (mm) .95 lbs. (.44 Kg)

#### General Specifications (All Models)

Frequency	2400 - 2500 MHz
Max. Input Power	100 mW (20 dBm)
Operating Mode	Bi-directional, half-duplex Time Division Duplex. Senses RF carrier from transmitter and automatically switches from receive to transmit mode
Water Resistant Rating (Outdoor Models)	IEC 60529 IPX7
Operating Temperature	-40°C to 50°C (-40°F to 122°F)
Current Draw (RTG and RTGI Models)	0.80A Peak Tx and 0.06A Peak Rx
Current Draw (RTGX and RTGXI Models)	1.25A Peak Tx and 0.14A Peak Rx
Supply Voltage (RTG and RTGI Models)	12VDC +/-1V
Supply Voltage (RTGX and RTGXI Models)	12VDC -0.5V / +1V

#### Note:

This Hyperlink bi-directional amplifier is designed for burst half-duplex operation. It is not intended for constant transmit or CW operation. Operation of the amplifier in CW mode will damage the amplifier and void the warranty.

#### Guaranteed Quality

HyperAmp® is designed and manufactured by HyperLink Technologies in the U.S.A. and is backed by Hyperlink's Limited Warranty.

## 2.4 GHz 24 dBi High Performance Die Cast Reflector Grid Wireless LAN Antenna - Model: HG2424G

### Applications and Features

- Applications:**
- 2.4 GHz ISM Band
  - IEEE 802.11b, 802.11g Wireless LAN
  - IEEE 802.11n (Pre-N, Draft-N, MIMO) Applications
  - WiFi Systems
  - Long-range Directional Applications
  - Point to Point Systems
  - Point to Multi-point Systems
  - Wireless Bridges
  - Backhaul Applications
  - Wireless Video Systems

- Features:**
- Superior performance
  - Die Cast aluminum construction
  - UV stable light gray powder coat finish
  - All weather operation
  - 8° beam-width
  - 12 inch coax lead
  - Easy to assemble
  - RoHS Compliant



### Description

#### Superior Performance

The HyperGain® HG2424G High-Performance Reflector Grid Wi-Fi Antenna provides 24 dBi gain with an 8 degree beam-width for long-range highly directional applications. Applications include point to point systems, point to multi-point and wireless bridges in the 2.4GHz ISM band as well as IEEE 802.11b, 802.11g and 802.11n wireless LAN systems. It can be installed for either vertical or horizontal polarization.



#### Rugged and Weatherproof



This 24dB grid antenna's construction features a rust-proof die cast aluminum reflector grid for superior strength and light weight. This antenna's 2-piece reflector grid is simple to assemble and significantly reduces shipping costs. The grid surface is UV powder coated for durability and aesthetics. The open-frame grid design minimizes wind loading.

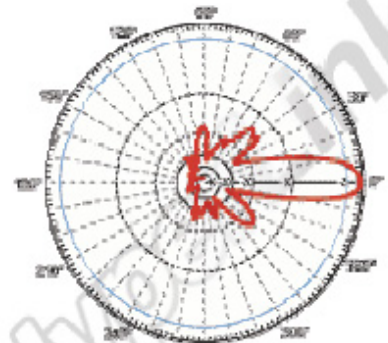
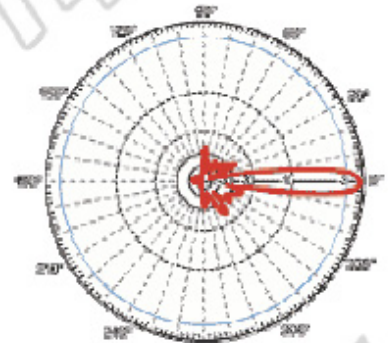
The HG2424G antenna is supplied with a 60 degree tilt and swivel mast mount kit. This allows installation at various degrees of incline for easy alignment. It can be adjusted up or down from 0° to 60°.

**Specifications**

<b>Frequency</b>	2400-2500 MHz
<b>Gain</b>	24 dBi
<b>-3 dBi Beam Width</b>	8 degrees
<b>Cross Polarization Rejection</b>	26 dBi
<b>Front to Back Ratio</b>	24 dB
<b>Sidelobe</b>	-20dB Max
<b>Impedance</b>	50 Ohm
<b>Max. Input Power</b>	50 Watts
<b>VSWR</b>	< 1.5:1 avg.
<b>Weight</b>	8 lbs. (3.62 kg)
<b>Grid Dimensions</b>	39.5 in (100 cm) x 23.5 in (60 cm)
<b>Mounting</b>	1.25 - 2 in. (31.8 - 50.8 mm) dia. mast
<b>Elevation Angle</b>	0 to +10 degrees
<b>RoHS Compliant</b>	Yes
<b>Operating Temperature</b>	-40° C to 85° C (-40° F to 185° F)
<b>Lightning Protection</b>	DC Short

**Wind Loading Data**

Wind Speed (MPH)	Loading (2.1 sq. ft.)
100	80.5 lb.
140	125.5 lb.


**Vertical**

**Horizontal**
**Guaranteed Quality**

This product is backed by Hyperlink's Limited Warranty