

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERIA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSMISOR DE
ELECTROCONDUCTIVIDAD Y pH

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL

JAIME EDUARDO YUMBLA ROJAS

DIRECTOR: DR. LUIS CORRALES

Quito, diciembre 2002

DECLARACIÓN

Yo, Jaime Eduardo Yumbla Rojas, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

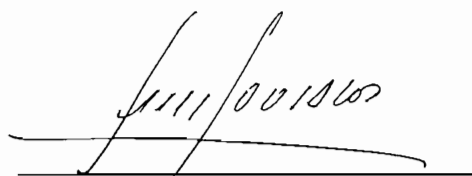
A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jaime Yumbla R.', is written over a horizontal line.

Jaime E. Yumbla R.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jaime Eduardo Yumbra Rojas, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Corrales', is written over a horizontal line.

Dr. Luis Corrales
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por iluminarme y guiarme por este difícil camino.

A mis queridos padres, de quienes recibí todo el cariño y apoyo en todo momento.

Al Dr. Luis Corrales, Director del Proyecto, por su valiosa ayuda y guía para la culminación de este trabajo.

A mis Familiares y Amigos que directa o indirectamente colaboraron en esta ardua tarea.

DEDICATORIA

A mis Padres, Jaime y Rosa, por todo su amor, cariño y comprensión.

A mis hermanos por su apoyo incondicional.

1.3.7.3	Influencia de los fertilizantes en el pH del sustrato.....	36
1.3.7.4	Influencia de las plantas en el pH del sustrato.....	36
1.4	TRANSMISORES.....	36
1.4.1	GENERALIDADES.....	36
1.4.2	TRANSMISORES ELECTRONICOS.....	39
1.4.2.1	Transmisor inteligente.....	41

CAPITULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TRANSMISOR DE ELECTROCONDUCTIVIDAD Y pH

2.1	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ACONDICIONADORES DE SEÑAL.....	45
2.1.1	CIRCUITO INTEGRADO AD620.....	45
2.1.2	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACONDICIONADOR PARA EL ELECTRODO DE pH.....	47
2.1.2.1	Electrodo de pH.....	49
2.1.2.2	Acoplador de impedancias.....	53
2.1.2.3	Circuito amplificador de instrumentación.....	54
2.1.3	DISEÑO DEL ACONDICIONADOR DE EC.....	58
2.1.3.1	Celda de electroconductividad.....	60
2.1.3.2	Tensión de excitación del sensor de conductividad.....	62
2.1.3.3	Circuito tipo puente y rectificador para el acondicionador de EC.....	66
2.1.3.4	Circuito amplificador de instrumentación.....	69
2.2	DISEÑO DEL CENTRO DE PROCESAMIENTO DE DATOS.....	72
2.2.1	SISTEMA INTELIGENTE.....	73
2.2.2	DISEÑO DEL CIRCUITO DEL TECLADO.....	74
2.2.3	MANEJO DEL MODULO LCD.....	75
2.2.4	SALIDA DE DATOS DIGITALES.....	78
2.3	TRANSMISION DE DATOS.....	79
2.3.1	EL TRANSMISOR DE 4 – 20 mA.....	79
2.3.2	CIRCUITO INTEGRADO AD694.....	80

2.3.3	DESCRIPCION FUNCIONAL DEL C.I. AD694.....	82
2.3.3.1	Amplificador buffer.....	83
2.3.3.2	Convertor voltaje/corriente.....	83
2.3.3.3	Generador offset de 4mA.....	84
2.3.3.4	Voltaje de referencia.....	84
2.3.4	DISEÑO DEL CIRCUITO TRANSMISOR.....	84
2.3.4.1	Conversión digital / analógica.....	85
2.3.4.2	Transmisión de datos.....	88

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE SOPORTE

INTRODUCCION.....	94
3.1 FUNCIONES DEL TRANSMISOR.....	95
3.2 MODOS DE CALIBRACION DE EC Y pH.....	98
3.2.1 MODO DE CALIBRACIÓN "AUTOSET EC, AUTOSET pH".....	98
3.2.2 MODO DE CALIBRACIÓN "CALIBRAR EC".....	99
3.2.3 MODO DE CALIBRACIÓN "CALIBRAR pH".....	99
3.2.4 CALCULO DE LOS VALORES DE ELECTROCONDUCTIVIDAD y pH.....	101
3.2.4.1 Modelo matemático para calcular el pH.....	101
3.2.4.2 Modelo matemático para calcular la EC.....	104
3.3 DESARROLLO DEL PROGRAMA EN EL MICROCONTROLADOR.....	105
3.3.1 PROGRAMA PRINCIPAL.....	106

CAPITULO 4

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

INTRODUCCION.....	127
4.1 PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD Y pH PARA TODO EL RANGO DE MEDICION.....	131
4.1.1 PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD.....	132

4.1.2	PRUEBAS DE pH.....	136
4.2	PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD Y PH PARA UN RANGO DE APLICACIÓN EN UNA FLORICULTURA.....	141
4.2.1	PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD.....	141
4.2.2	PRUEBAS DE pH.....	145
4.3	PRUEBAS DE VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA SOLUCION.....	148

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES.....	151
5.2	RECOMENDACIONES.....	156

REFERENCIAS BILIOGRAFICAS.....	158
--------------------------------	-----

ANEXOS

RESUMEN

El riego de agua en las plantaciones necesita un riguroso monitoreo de la Electroconductividad (EC) y pH, para controlar y mejorar la producción en las mismas. Para ayudar a vigilar el valor de estos dos importantes parámetros se fabrican transmisores de EC y pH. El propósito de este proyecto es explorar la posibilidad de diseñar y construir un transmisor que pueda hacerse con tecnología local, en particular empleando un microcontrolador PIC. El transmisor desarrollado está conformado por tres etapas:

- Acondicionadores de señal.
- Centro de Procesamiento de datos.
- Transmisión.

Los acondicionadores de señal que se diseñaron tomaron como base amplificadores de instrumentación AD620. Estos cumplieron satisfactoriamente con su función de proveer niveles de voltaje de acuerdo a las exigencias de entrada del microcontrolador PIC.

Para el procesamiento de datos se buscó un microcontrolador PIC que permita darle al transmisor la posibilidad de autocalibrarse, condición indispensable si se toma en cuenta que en la práctica las características de los electrodos de medición tienden a variar por desgaste. El PIC seleccionado fue el 16F872 al que se le utilizó en un 70% de su capacidad de procesamiento. Para la etapa de transmisión se buscó dispositivos que permitan entregar una señal de 4 a 20 mA hasta una carga máxima de 1100Ω , valor que es de uso común en la industria. El circuito integrado AD620 que se seleccionó soportó con un error de 0.25% las pruebas a las que se sometió el equipo. Se adicionaron un módulo LCD y 4 teclas de operación procurando simplificar el manejo del equipo aquí diseñado.

En pruebas realizadas tanto con soluciones tampón como en el campo se logró un error promedio de 1.25% para la Electroconductividad y 1.29% para el pH. Estos errores no tienen incidencia en el desarrollo de los cultivos y en la conservación del suelo.

PRESENTACIÓN

El término fertirrigación es ya de uso cotidiano entre las personas vinculadas a la agricultura intensiva, y sobre su concepto, que engloba la nutrición hídrica y mineral de los cultivos, se concentra buena parte de los avances técnicos y tecnológicos que sustentan la revolución que en la actualidad está aconteciendo en la agricultura, y que consiste en la aplicación a gran escala de la electrónica y la informática a los sistemas de cultivo.

La técnica de la fertirrigación involucra el empleo de determinados parámetros físico - químicos, la mayor parte de ellos conocidos intuitivamente por parte de la gente que los maneja, pero que muy pocos conocen de manera exhaustiva.

Pero es de mucha importancia que los técnicos que desarrollan su labor en este campo, conozcan los fundamentos teóricos de estos parámetros para que después puedan realizar una aplicación más correcta e interpretación práctica de los mismos.

Entre las magnitudes monitoreadas y controladas en los invernaderos están:

- Temperatura.
- pH.
- Humedad Absoluta y Relativa.
- Conductividad.
- Radiación.

El control de estas magnitudes provoca un mejoramiento en la calidad y producción en las plantaciones. El monitoreo y control de la Electroconductividad y pH es un indicativo de la cantidad de nutrientes y de fertilizantes en el agua de riego de distintas especies de plantas.

Este proyecto, se concentra en monitorear la Electroconductividad y pH en el agua de riego para invernaderos y plantaciones, y entregar una señal industrial de 4 a 20 mA. Debido a que los sensores tienden a perder sus características iniciales, se ha visualizado que el aparato que aquí se ha desarrollado, se pueda autocalibrar utilizando sustancias patrones. La medición de la conductividad permite tener una idea muy aproximada de la cantidad de sales disueltas, y el pH es la expresión de una magnitud química que denota el grado de acidez o alcalinidad de una solución.

Para organizar y presentar este trabajo de la forma más didáctica posible, este proyecto se ha dividido de la forma siguiente:

En el Capítulo 1 se realiza una explicación de: la Electroconductividad, el pH, circuitos de transmisión tipos de sensores para el monitoreo de la Electroconductividad y pH en el agua, así como encuadrar su significado agronómico en el sistema suelo/ sustrato - planta y su aplicación práctica en la agricultura intensiva.

En el Capítulo 2 se procede al diseño y construcción de los acondicionadores para los sensores de Electroconductividad y pH. En este Capítulo se estudian los diferentes circuitos integrados utilizados para estos propósitos, así como también sus características y funcionamiento. En este mismo Capítulo se diseña y construye el centro de procesamiento de datos, cuya función es convertir las señales analógicas que vienen de los acondicionadores, mostrar la Electroconductividad y pH en un dispositivo visualizador y enviar datos respectivos hacia la etapa de transmisión para finalmente tener señales de corriente industriales de 4 a 20 mA correspondientes a los valores de Electroconductividad y pH.

El Capítulo 3 trata el diseño del programa en el microcontrolador PIC. Una de las partes fundamentales del programa es la posibilidad de manipular los datos que llegan de los acondicionadores. Debido a que los sensores tienden a perder sus características iniciales con el uso, el instrumento diseñado tiene la

posibilidad de autocalibrarse con la ayuda de sustancias patrones tanto de electroconductividad como de pH. La autocalibración se la va a realizar con la ayuda de un teclado constituido por las teclas ESC, MENU, SELECT y ENTER.

En el Capítulo 4 se realizan las pruebas de los circuitos acondicionadores y de transmisión, utilizando un instrumento patrón para dicho propósito.

Por último en el Capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos del Transmisor de Electroconductividad y pH, así como también se da un resumen de los elementos y costos utilizados para la construcción del Transmisor.

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES

CAPITULO 1.

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIONES

Actualmente existe una gran demanda de tecnología en la agricultura, particularmente, la floricultura. Un dispositivo de gran demanda es el transmisor de Electroconductividad (EC) y pH.

Si el agua de riego es de buena calidad puede producir una mejoría en la tierra, pero si el agua es inapropiada, la tierra puede deteriorarse hasta quedar imposibilitada de producir cosechas satisfactorias: Para ello entre las magnitudes que se debe monitorear son la Electroconductividad y el pH. La medición de la conductividad nos permite tener una idea muy aproximada de la cantidad de sales disueltas, y el pH indica la acidez o alcalinidad.

El dispositivo que se va a diseñar debe medir los niveles de Electroconductividad y pH del agua de riego, y entregar una señal industrial de 4 a 20 mA para accionar válvulas, actuadores, y otros dispositivos que mantengan los niveles de EC y pH del agua de riego dentro del rango permitido para el riego.

Para monitorear la Electroconductividad y el pH, se requiere que el diseñador elija correctamente los tipos de sensores a usar, partiendo de los rangos que se van a monitorear. El transmisor que se va a diseñar está destinado a la floricultura, en los invernaderos donde existe el control en el agua de riego.

Los rangos de las magnitudes que se van a monitorear son:

EC: 0 – 10 (ms /cm)

pH: 0 - 14

Debido a que los sensores tanto de Electroconductividad como de pH tienden a perder sus características iniciales y por el alto costo de los mismos se deberá autocalibrar el dispositivo utilizando sustancias patrones. Para facilitar esta tarea, el dispositivo deberá contar con un dispositivo visualizador y un teclado que ayude a su manejo.

En este Capítulo se realizará una descripción de las variables a ser medidas por el transmisor, los tipos y características de sensores de Electroconductividad y pH que existen en el mercado, la descripción y características de distintos transmisores de señal.

1.2 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

1.2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

En general, el flujo de electricidad a través de un conductor se debe al desplazamiento de electrones. Dependiendo de como se desplazan los electrones, los conductores eléctricos pueden ser de dos tipos: conductores metálicos o electrónicos y conductores iónicos o electrolíticos.

A este segundo tipo pertenecen las soluciones acuosas. En ellas la conducción de electricidad al aplicar un campo eléctrico se debe al movimiento de los iones en disolución, los cuales transfieren los electrones a la superficie de los electrodos para completar el paso de corriente.

La conductividad eléctrica de una disolución puede definirse como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos^{1,1}) para conducir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes, de la viscosidad del medio en el que éstos han de moverse y de la temperatura. En el presente caso, este medio es agua, y puesto que su viscosidad disminuye con la temperatura, la facilidad de transporte iónico o conductividad aumentará a medida que se eleva la temperatura.

Las soluciones nutritivas contienen partículas iónicas que llevan cargas y por lo tanto poseen esta habilidad. Cuanto mayor es la cantidad de estos iones disueltos en el agua, la conductividad de la solución resultante es mayor. Por lo tanto, la medición de la conductividad eléctrica de una solución nutritiva tiene una relación directa con la cantidad de materiales sólidos disociados que hay disueltos en ella.

El agua pura prácticamente no conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad.

En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad. Este efecto continúa hasta que la solución está tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, dándose casos de dos diferentes concentraciones con la misma conductividad. (Ver Tabla 1.1)

Todos los valores de conductividad de la Tabla 1.1 están referidos a una temperatura de 25°C.

Temperatura de la muestra 25 ° C	Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua ultrapura	0.05
Agua destilada	0.5
Agua de montaña	10
Agua desmineralizada	1-80
Agua potable	50 a 100
Agua de mar	53,000
5 % NaOH	223,000
50 % NaOH	150,000
10 % HCl	700,000
32 % de HCl	700,000
31 % HNO ₃	865,000

Tabla 1.1 Valores de conductividad de algunas muestras típicas

^{1.1} Electrolitos son las sustancias que, disueltas en agua, hace que la disolución sea conductora de la electricidad.

El agua pura, comercializada como agua destilada, y utilizada, por ejemplo, en hierros eléctricos, baterías de ácido de plomo y aplicaciones de horticultura, tiene una conductividad de $10 \mu\text{S}$ equivalente a una resistencia de $100 \text{ K}\Omega$. Cuando el agua es menos pura, la resistencia entre los electrodos disminuye, y el valor de la conductancia aumenta. El agua de grifo normal tiene una conductancia de aproximadamente 1 ms , y el agua del mar llega a ser de 100 ms o más.

Algunas sustancias se ionizan en forma más completa que otras y por lo mismo conducen mejor la corriente. Cada ácido, base o sal tiene su curva característica de concentración versus la conductividad.

Son buenos conductores: los ácidos, bases y sales inorgánicas: HCl , NaOH , NaCl , Na_2CO_3 ... etc.

Son malos conductores: las moléculas de sustancias orgánicas que por la naturaleza de sus enlaces son no iónicas: como la sacarosa, el benceno los hidrocarburos, los carbohidratos...etc, estas sustancias, no se ionizan en el agua y por lo tanto no conducen la corriente eléctrica.

Un aumento en la temperatura, disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad. Este efecto de la temperatura es diferente para cada ion, pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, la conductividad varía de 1 a 4% por cada $^{\circ}\text{C}$. Para una solución salina iónica común, este valor es aproximadamente 2% por cada $^{\circ}\text{C}$. Los ácidos, los álcalis y las soluciones salinas concentradas tienen un valor algo más bajo, típico 1.5% por cada $^{\circ}\text{C}$.

Debido a que una pequeña diferencia de temperatura provoca un cambio grande en la conductividad, es necesario compensar las lecturas de conductividad, especialmente a altas y bajas temperaturas. Las lecturas se normalizan por lo general a 25°C .

Conociendo estos factores, la medición de la conductividad permite tener una idea muy aproximada de la cantidad de sales disueltas.

1.2.2 PRINCIPIOS

Las medidas de conductividad se hacen fundamentalmente para determinar la concentración de una disolución o para determinar la cantidad relativa de una sal en una solución acuosa. El principio empleado es el de la *conducción electrolítica*, en el que los portadores de carga provienen de ionización. Cuando una corriente fluye por un volumen de una disolución, los compuestos inorgánicos solubles de la disolución se separarán parcial o completamente en cationes (iones cargados positivamente) y aniones (iones cargados negativamente). Por ejemplo, el NaCl produce iones Na^+ y Cl^- , el AgNO_3 produce iones Ag^+ y NO_3^- . Generalmente los iones metálicos y de hidrógeno son cationes, y los iones no metálicos y de radicales negativos son aniones. La corriente ionizante se origina desde dos electrodos: el ánodo y el cátodo. Los cationes se dirigirán al cátodo, en el que se combinarán con los electrones de la fuente de corriente para formar átomos de hidrógeno o de metal. Los aniones se dirigirán al ánodo, en el que formarán átomos neutros o moléculas y liberarán sus electrones, que fluirán entonces hacia la fuente de corriente (Figura 1.1).

Cuando se aplica un potencial a dos electrodos sumergidos en una disolución, la corriente que circula por el circuito será función de la tensión aplicada y de la resistencia de la disolución. Esta resistencia, a su vez, es función de la naturaleza del disolvente (agua, he aquí un factor constante, en el caso de soluciones acuosas), del número de iones presentes, y de la movilidad iónica. La conductancia (G) es el recíproco de la resistencia (R), (Ecuación 1.1).

$$G=1/R$$

Ecuación 1.1

La conductancia (electrolítica) de una disolución es pues proporcional al número de iones y a la movilidad del ion. La conductancia se expresa en siemens (S); en un principio se expresaba como mho^{1.2}. El parámetro que caracteriza la concentración de la disolución es la *conductividad* (δ), expresada en S/m (frecuentemente se utilizan submúltiplos tales como $\mu\text{S/cm}$, mS/cm , dS/m).

$$1 \mu\text{S/cm} = 0.001 \text{ mS/cm} = 0.000001 \text{ S/cm} = 1 \mu\text{mho/cm}$$

La medida de la conductividad viene dada por la medida de la conductancia de la columna de líquido entre dos electrodos. Sean dos electrodos en forma de placas paralelas, cada una con una misma sección A, separadas por una distancia L, con un volumen de separación uniforme (Figura 1.1), la conductividad queda expresada en la Ecuación 1.2.

$$\delta = G * L/A \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Cuando la conductancia se expresa en siemens, la superficie de los electrodos en cm^2 , y la distancia de separación en cm, la conductividad estará expresada en S/cm, su unidad más frecuente.

La relación L/A es una constante para una configuración de electrodo dada y es conocida como *constante del sensor* (constante de célula), representada por K_s ; luego, de la Ecuación 1.2, se tiene la Ecuación 1.3.

$$\delta = G * K_s \quad \text{Ecuación 1.3}$$

^{1.2} mho viene de ohm, unidad de resistencia, escrito al revés

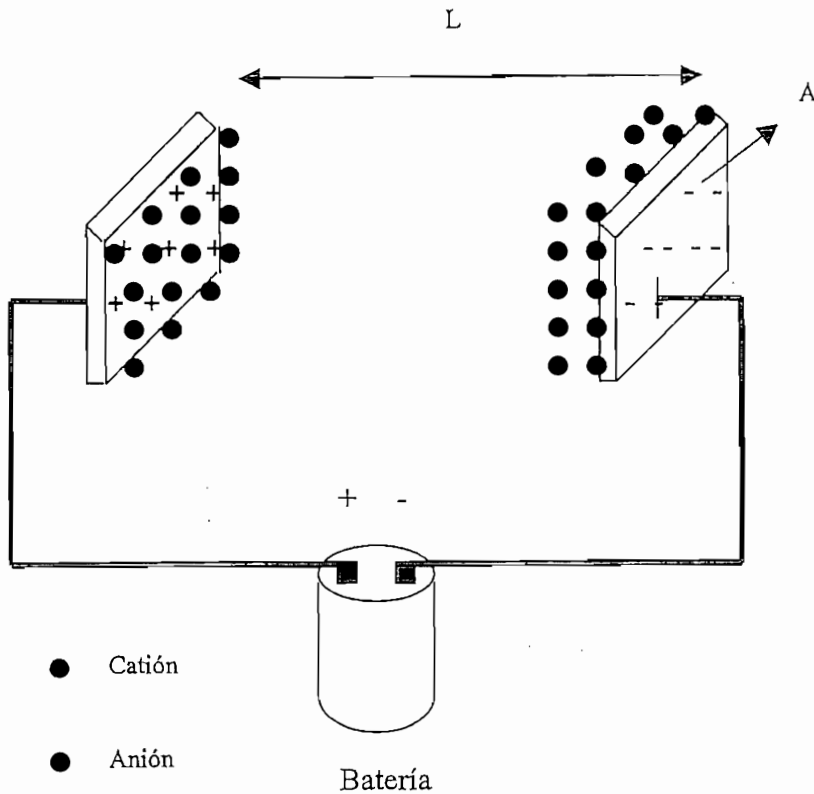


Figura 1.1 Potencial aplicado a dos placas paralelas dentro de una solución

Configuraciones que emplean dos placas planas paralelas son muy poco frecuentes, y el volumen de separación puede ser no uniforme. Sin embargo, se han desarrollado las relaciones más complejas para configuraciones de electrodos tales como barras paralelas o concéntricas para geometrías de electrodo anulares internas o externas y se han determinado consecuentemente las constantes del sensor. Materiales que se utilizan frecuentemente como electrodos son: níquel, carbono, acero inoxidable y aleaciones níquel-hierro; a veces se usan recubrimientos de oro. Entre los materiales de aislamiento se incluyen polivinilcloridos, epoxis, siliconas y plásticos resistentes a la corrosión (especiales) y a altas temperaturas. Dado que la medida de la temperatura del fluido tiene una fuerte influencia sobre las medidas, generalmente en los sensores de conductividad, se incorporan termómetros de película metálica o termistores; en algunos casos se especifica que sean instalados en el interior del sensor (o junto a él).

Como la Electroconductividad (EC) varía según la temperatura de medida, debe ir siempre acompañada de la temperatura a la que se efectúa la medición, 20°C según la norma AFNOR o 25°C según la norma CEE.

$$EC \text{ a } 25^{\circ}\text{C} \cong 1.112 \times EC \text{ a } 20^{\circ}\text{C}$$

Ecuación 1.4

Cuando la medida no se realiza a esta temperatura y el conductímetro no posee compensación automática de la misma, se usan unos factores de conversión que existen tabulados para cualquier temperatura. En la Tabla 1.2 se muestran los factores de temperatura (f_t) para corregir los datos de resistencia y conductividad de extractos a la temperatura estándar de 25°C.

$$EC_{25} = EC_t * f_t$$

Ecuación 1.5

$$EC_{25} = (K_s / R_t) * f_t$$

Ecuación 1.6

$$R_{25} = R_t / f_t$$

Ecuación 1.7

°C	F _t	°C	f _t	°C	f _t
3.0	1.709	22.0	1.064	29.0	0.925
4.0	1.660	22.2	1.060	29.2	0.921
5.0	1.613	22.4	1.055	29.4	0.918
6.0	1.569	22.6	1.051	29.6	0.914
7.0	1.528	22.8	1.047	29.8	0.911
8.0	1.488	23.0	1.043	30.0	0.907
9.0	1.448	23.2	1.038	30.2	0.904
10.0	1.411	23.4	1.034	30.4	0.901
11.0	1.375	23.6	1.029	30.6	0.897
12.0	1.341	23.8	1.025	30.8	0.894
13.0	1.309	24.0	1.020	31.0	0.890

°C	F_t	°C	f_t	°C	f_t
14.0	1.277	24.2	1.016	31.2	0.887
15.0	1.247	24.4	1.012	31.4	0.884
16.0	1.218	24.6	1.008	31.6	0.880
17.0	1.189	24.8	1.004	31.8	0.877
18.0	1.163	25.0	1.000	32.0	0.873
18.2	1.157	25.2	0.996	32.2	0.870
18.4	1.152	25.4	0.992	32.4	0.867
18.6	1.147	25.6	0.988	32.6	0.864
18.8	1.142	25.8	0.983	32.8	0.861
19.0	1.136	26.0	0.979	33.0	0.858
19.2	1.131	26.2	0.975	34.0	0.843
19.4	1.127	26.4	0.971	35.0	0.829
19.6	1.122	26.6	0.967	36.0	0.815
19.8	1.117	26.8	0.964	37.0	0.801
20.0	1.112	27.0	0.960	38.0	0.788
20.2	1.107	27.2	0.956	39.0	0.775
20.4	1.102	27.4	0.953	40.0	0.763
20.6	1.097	27.6	0.950	41.0	0.750
20.8	1.092	27.8	0.947	42.0	0.739
21.0	1.087	28.0	0.943	43.0	0.727
21.2	1.082	28.2	0.940	44.0	0.716
21.4	1.078	28.4	0.936	45.0	0.705
21.6	1.073	28.6	0.932	46.0	0.694
21.8	1.068	28.8	0.929	47.0	0.683

Tabla 1.2 Factores de Temperatura

La conductividad específica de una solución de electrolitos, que es el caso que nos atañe, depende de la concentración de las especies iónicas presentes. La conductividad equivalente (L_e) se define como:

$$L = k / c^* = k \cdot (1000/c) \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Donde c^* es la concentración en equivalentes por cm^3 , y c es la concentración en equivalentes por litro (N). La conductividad equivalente es pues: la conductividad generada por cada meq/l existente en disolución de una especie dada.

La conductividad de una solución es igual a la suma de las conductividades de cada tipo de ión presente. Para una sola sal disuelta, la conductividad equivalente se puede expresar como: $L = l^+ + l^-$ donde l^+ es la conductividad equivalente del catión y l^- la del anión. Así pues, teóricamente sería muy sencillo predecir la EC de una solución conociendo su composición iónica, ya que l^+ y l^- son constantes que dependen del tipo de ión en cuestión. Para mezclas, L debería ser igual a la suma de todas las conductividades equivalentes de cationes y aniones, pero la conductividad equivalente de sales o iones disminuye con el aumento de concentración.

Este fenómeno está directamente relacionado con las fuerzas interiónicas presentes en la solución. Un catión siempre tendrá más aniones en su vecindad que los que le corresponderían por pura distribución de probabilidades; esta atmósfera iónica tiende a frenar la movilidad del ión. Además se ha comprobado que el descenso de conductividad equivalente con la concentración es mucho más acusado cuando la carga de los iones es mayor. Por esta razón, aguas de riego salobres, donde el componente aniónico principal son los sulfatos unidos a calcio y/o magnesio (todos ellos iones divalentes), presentan EC mucho más bajas de lo esperado a pesar de la cantidad de sales totales disueltas.

Para soluciones más diluidas, la atmósfera iónica empieza a debilitarse, y a dilución infinita las fuerzas interiónicas no influyen sobre la movilidad de los iones, alcanzando la conductividad equivalente su máximo valor: $L^0 = l^0_+ + l^0_-$ siendo L^0 ,

la conductividad equivalente del electrolito a dilución infinita; $I^{\circ+}$, la conductividad equivalente a dilución infinita debida al catión y $I^{\circ-}$ la debida al anión. La Tabla 1.3^{1,3} muestra las conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita en disoluciones acuosas a 25°C para los iones más usuales en agronomía, expresados en mS/cm por cada meq/l.

Cationes	$I^{\circ+}$	Aniones	$I^{\circ-}$
H ⁺	349.7	OH ⁻	198.0
Na ⁺	50.1	Cl ⁻	76.3
K ⁺	73.5	NO ₃ ⁻	71.4
NH ₄ ⁺	73.5	HCO ₃ ⁻	44.5
Mg ⁺²	53.0	CO ₃ ⁻²	69.3
Ca ⁺²	59.5	SO ₄ ⁻²	80.0
H ₂ PO ₄ ⁻	33	H ₂ PO ₄ ⁻	33

Tabla 1.3 Conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita (mS/cm por cada meq/l) en disoluciones acuosas a 25 °C para los iones más usuales en agronomía

En la Tabla 1.4 se puede comprobar la diferencia entre la EC real y la teórica (en mS/cm a 25°C) si no existieran fuerzas interiónicas en el seno de la disolución para cuatro tipos distintos de aguas de riego.

Se puede comprobar como la EC real se aleja de la teórica a medida que hay mayor cantidad de iones en disolución y conforme predominan los divalentes sobre los monovalentes. Asimismo queda claro que, usado directamente, éste no es un buen método para el cálculo de la EC final de una mezcla fertilizante que a veces se hace necesario conocer de antemano.

^{1,3} Fuente: *Handbook of Chemistry and Physics*. David R. Lide, Editor in Chief. 73rd Edition. 1992-1993

El aparato necesario para hacer medidas de conductividad es, generalmente, barato y simple. Por esta razón, las medidas de conductividad encuentran gran aceptación en la industria, como una herramienta analítica y también en laboratorios y en procesos de control. Instrumentos compactos y relativamente baratos son equipados con células/celdas especiales que leen directamente la conductividad específica, o la traducen a ppm de sales.

Iones (meq/l)	Agua 1	Agua 2	Agua 3	Agua 4
Ca^{+2}	1.55	5.50	6.17	31.60
Mg^{+2}	0.07	4.72	9.97	24.82
Na^{+}	1.04	4.12	42.99	10.34
SO_4^{-2}	0.82	7.58	9.30	48.28
CE teórica	362	1842	7694	9057
CE real	323	1310	5960	4360

Tabla 1.4 Diferencia de CE (mS/cm a 25°C) real y teórica sin considerar las fuerzas interiónicas, para cuatro aguas de riego de diferente composición

1.2.3 SENSORES DE CONDUCTIVIDAD

Una representación teórica del sensor se muestra en la Figura 1.2

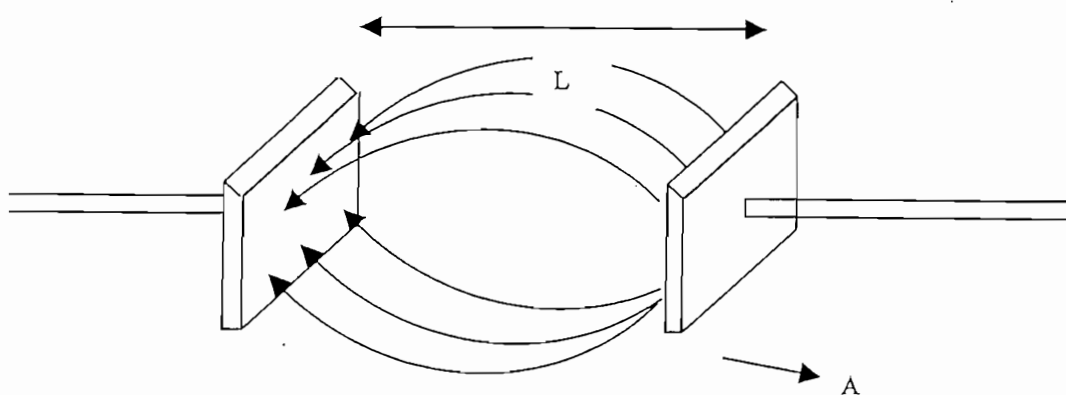


Figura 1.2 Diagrama de un sensor de dos electrodos.

El sensor de dos electrodos es el más comúnmente utilizado ^{1.4} para medir la conductividad.

Las aplicaciones más frecuentes de los sensores de conductividad se encuentran en medidas de concentración de disoluciones (pudiendo utilizarse para control de la dilución) y en medidas de la cantidad total de sólidos disueltos en aguas naturales. Las lecturas realizadas para el análisis de concentración de un componente se relacionan con la concentración mediante gráficos, tablas y grabaciones de lecturas obtenidas previamente. La determinación de la concentración de un componente específico en disoluciones compuestas de varios elementos es más difícil. En general, tales medidas pueden obtenerse si la concentración de los componentes no medidos se mantiene razonablemente constante, o bien, si el componente cuya concentración se desea medir tiene una conductividad mucho mayor que los otros componentes. Los sensores de conductividad se usan también en la detección de goteo y derrame (en líquidos en los que la conductividad fuera función de tales sucesos) y en mediciones de salinidad.

1.2.4 INFLUENCIA DE LA EC EN LAS PLANTAS

Al utilizar una excesiva cantidad de fertilizantes en las plantaciones se produce la salinización de los suelos. La salinidad del suelo trae consigo un doble problema para las plantas. Primeramente ciertas sales en concentración excesiva dentro de la planta producen fitotoxicidad. Luego, la excesiva cantidad de sales disueltas en el agua del suelo dificulta la absorción de los nutrientes; es decir, por un proceso de simple osmosis, el agua de las raíces tiende a salir al suelo en lugar de que el agua con nutrientes entre desde el suelo en las raíces.

^{1.4} Manual cole parmer 2001.Pag 181. CONDUCTIVITY.

1.3 PH

1.3.1 ACIDOS Y BASES

Una de las clasificaciones más importantes de las sustancias es aquella que se expresa en términos de las propiedades ácidas o básicas de dicha sustancia. En los albores de la química experimental se reconoció que ciertas sustancias, conocidas como ácidos, poseían un sabor característico y capaces de disolver metales activos como el zinc. Los ácidos también provocaban la muerte de los vegetales y adoptaban un color característico; por ejemplo, el tornasol, que se obtiene de ciertos líquenes (una planta compuesta de un alga y un hongo), se vuelve rojo al ponerlo en contacto con sustancias ácidas. Al igual que los ácidos, las bases poseen propiedades características que permiten su identificación. Mientras que los ácidos tienen un sabor agrio (el sabor agrio del limón se debe a la presencia de ácido cítrico en el jugo de limón), las bases tienen un sabor amargo característico. Las bases tienen también una sensación resbaladiza al tacto. Mientras que los ácidos hacen que el tornasol adopte un color rojo, las bases en que adopte color azul. Las bases también reaccionan con muchas sales metálicas disueltas para formar precipitados.

El hecho de que todos los ácidos y todas las bases muestran ciertas propiedades químicas características sugiere que deben haber hechos comunes a todos los miembros de cada grupo. Lavoisier propuso que los ácidos eran sustancias que contenían oxígeno. De hecho, Lavoisier derivó el nombre oxígeno de la palabra griega que significa "formador de ácido". Sin embargo, estudios cuidadosos de un número de científicos han demostrado que el ácido clorhídrico no contiene oxígeno. Para el año de 1830 se descubrió que el hidrógeno era el único elemento que estaba presente en todos los ácidos. Posteriormente se demostró que las disoluciones acuosas tanto de los ácidos como de las bases conducen la corriente eléctrica. En el año de 1880, el químico suizo Svante Arrhenius (1859-1927) sugirió la existencia de iones para explicar esa conducción

eléctrica. Poco tiempo después, propuso que los ácidos eran sustancias que formaban iones H^+ en disoluciones acuosas y que las bases producían iones OH^- .

1.3.2 El pH

Prácticamente en cualquier área de la química pura o de la química aplicada las propiedades ácido - base del agua son de gran importancia. Como ejemplo, la posibilidad de contaminantes químicos en el agua corporal, la rapidez con la que un metal que se encuentra sumergido en agua se corroe, y la disponibilidad de un medio acuático para el desarrollo de los peces y de las plantas depende en forma crítica de la acidez o de la basicidad del agua. El pH (potencial de hidrógeno) es la expresión de una magnitud química que denota el grado de acidez o alcalinidad de un compuesto químico (en nuestro caso, el agua).

En 1909, el químico danés Sorensen, definió el potencial hidrógeno (pH), como el logaritmo negativo en base 10 de la concentración de iones hidrógeno (concentración molar o actividad molar).^{1.5} Esto es:

$$pH = -\log [H^+] = \log (1/[H^+]) \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Donde:

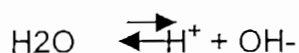
H^+ = concentración de iones de hidrógeno en moles/litro

Obsérvese que un cambio en $[H^+]$ por un factor de 10 resulta en un cambio de unidad en el pH.

^{1.5} Por lo general, se encuentra la definición de pH como $-\log[H^+]$, y ocasionalmente como $\log[H_3O^+]$

La acidez de una solución se debe a la presencia de iones de hidrógeno, de manera que, si una solución de ácido contiene 1 g/l de hidrógeno ionizado, tiene la misma fuerza, sea cual fuere el ácido que se use para obtener la solución cuando se requiere una reacción de neutralización. Los ácidos fuertes tienen un alto grado de ionización, mientras que los más débiles poseen un grado menor. Esto mismo se aplica a los iones de hidroxilo de las soluciones alcalinas. Una solución neutra que tiene un pH de 7.00 es una solución en la que existe un equilibrio o balance entre el número de iones de hidrógeno (H^+) y los iones de hidroxilo (OH^-), ambos presentes en el líquido.

El agua siempre se ioniza en pequeña proporción, produciendo tanto iones hidrógeno como iones hidroxilo.



Consecuentemente, el agua puede considerarse, desde el punto de vista de la ionización, a la vez como ácido o como base. La concentración de los iones $[H^+]$, así como de los iones $[OH^-]$ es igual 0.0000001 veces el peso de los iones gramo del H^+ o del OH^- expresados en gramos por litro.

Para evitar el uso de cifras decimales al medir las concentraciones de iones hidrógeno se ha adoptado una escala de valores del pH mediante la cual se registre la concentración en números enteros.

En la siguiente lista de valores (Tabla 1.5), las concentraciones de iones hidrógeno y la de los iones hidroxilo aparecen como múltiplos de 10:

Rango	PH	[H ⁺] concentración (mol /l)	OH- concentración (mol/l)
Acido	0	1	0.000000000000001
	1	0.1	0.00000000000001
	2	0.01	0.0000000000001
	3	0.001	0.000000000001
	4	0.0001	0.00000000001
	5	0.00001	0.000000001
	6	0.000001	0.00000001
Neutro	7	0.0000001	0.0000001
Basico	8	0.00000001	0.000001
	9	0.000000001	0.00001
	10	0.0000000001	0.0001.
	11	0.00000000001	0.001
	12	0.000000000001	0.01
	13	0.0000000000001	0.1
	14	0.00000000000001	1

Tabla 1.5 Valores de concentraciones de iones hidrógeno y la de iones hidroxilo

Debe notarse que el valor del pH es igual al número de cifras decimales que representan la concentración de los iones hidrógeno por litro.

En la Figura 1.3 se señala el pH de algunas soluciones. En general hay que decir que la vida se desarrolla en pH próximos a la neutralidad.

La escala de pH en la Figura 1.3 se muestra desde 0 hasta 14, debido a que en lo general casi todas las disoluciones tienen un pH dentro de esta distribución. Sin embargo, en principio, los valores de pH para las disoluciones ácidas fuertes pueden ser menores de 0, y para las disoluciones básicas fuertes pueden ser mayores que 14.

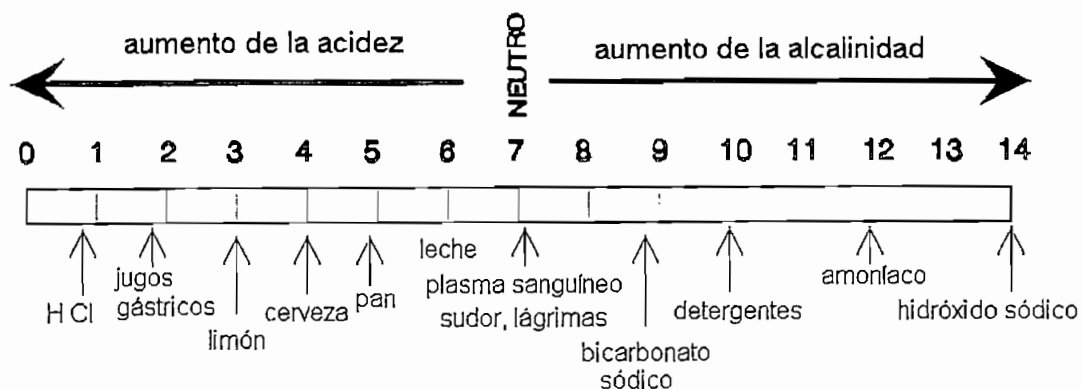


Figura 1.3 pH de algunas soluciones.

Los organismos vivos no soportan variaciones del pH mayores de unas décimas de unidad y por eso han desarrollado a lo largo de la evolución sistemas de tampón o *buffer*, que mantienen el pH constante mediante mecanismos homeostáticos.

Los sistemas tampón consisten en un *par ácido - base conjugada* que actúan como dador y aceptor de protones respectivamente.

El tampón bicarbonato es común en los líquidos intercelulares, mantiene el pH en valores próximos a 7.4, gracias al equilibrio entre el ión bicarbonato y el ácido carbónico, que a su vez se disocia en dióxido de carbono y agua.

Existen dos formas generales de medir la acidez o la alcalinidad de una solución que son:

- indicadores químicos
- medidores de pH

1.3.3 INDICADORES QUIMICOS

Un indicador químico es una sustancia coloreada, casi siempre derivada de una planta que puede existir en forma ácida o básica. Las dos formas tienen diferente color. Añadiendo una pequeña cantidad de un indicador a una disolución y observando su color es posible determinar si se trata de un ácido o de una base. Si se conoce el pH al cual el indicador cambia de un color a otro, se puede determinar mediante el color, si la disolución tiene un pH más alto o más bajo que este valor.

En condiciones ideales, el mejor límite de precisión es 0.1 unidad de pH. Para obtener este límite es necesario preparar estándares por cada 0.2 de unidad de pH por encima del rango que se va a medir. En los casos en que este grado de precisión sea aceptable, el indicador químico constituye un método barato; sin embargo, se debe usar teniendo en cuenta que las soluciones indicadoras no son estables y cambian de color. Esa inestabilidad y este cambio de color pueden originar errores notables si no se controlan de un modo preciso.

Para indicaciones cualitativas aproximadas para determinar si una solución es neutra, ácida o alcalina, se puede emplear papel de litmo rosa o azul. Por ejemplo, si un trozo de papel de litmo azul se torna blanco en una solución, dicha solución se clasifica como acidulada. Si permanece azul, la solución es neutra o alcalina. Si la solución es fuertemente alcalina, el azul adquiere una tonalidad más profunda. Por el contrario, si un trozo de papel de litmo rosa se hace blanco, la solución es neutra o ácida. Las soluciones ácidas fuertes se indican mediante una coloración más profunda de rosa. Se puede ver claramente que es difícil establecer valores de pH usando estas técnicas.

Algunos de los indicadores que se utilizan con más frecuencia se enumeran en la Tabla 1.6.

Nombre	Intervalo de pH para el cambio de Color	Color ácido	Color básico
Violeta de metilo	0-2	Amarillo	Violeta
Amarillo de metilo	1.2-2.3	Rojo	Amarillo
Naranja de metilo	2.9-4.0	Rojo	Amarillo
Rojo de metilo	4.2-6.3	Rojo	Amarillo
Azul de bromotimol	6.0-7.6	Amarillo	Azul
Azul de timol	8.0-9.6	Amarillo	Azul
Fenolftaleína	8.3-10	Incoloro	Rosa
Amarillo de alizarina G	10.1-12.0	Amarillo	Rojo

Tabla 1.6 Indicadores de pH

1.3.4 MEDIDORES DE pH

La necesidad de determinaciones cuantitativas de los valores de pH condujo al desarrollo de detectores de iones de hidrógeno especiales y de sus circuitos asociados, denominados pH metros. La mayoría de estos medidores son básicamente del tipo de potenciómetro, el que permite obtener una lectura eléctrica. En la Figura 1.4 se muestra un sistema de este tipo que consiste en una celda o un electrodo de medición, una celda o un electrodo de referencia, un circuito potenciómetro, un amplificador y un medidor para determinar voltajes. Se trata de un sistema de tipo de lectura directa. Los medidores de pH industriales casi siempre son del tipo de lectura directa con escalas de pH para indicación visual o para registro. El registro se utiliza en aplicaciones de procesos continuos. El pH metro también es común que se le encuentre en los laboratorios en los que se llevan a cabo investigaciones en química o en otras ciencias aplicables. Los electrodos del pH metro cuando se colocan en la disolución que se va a medir, tienen la sensibilidad de medir voltajes pequeños del orden de los milivoltios. Cuando los electrodos se colocan en la disolución, se forma una celda electroquímica (parecida a una batería), que tiene un voltaje. El voltaje de la celda

es dependiente de $[H^+]$; en esta forma, midiendo el voltaje se puede obtener la medida de $[H^+]$. Los electrodos que se utilizan con el medidor del pH pueden tener diferentes formas y tamaños, dependiendo del uso que se les vaya a dar, pero fundamentalmente casi todos son similares. Uno de ellos es un electrodo de referencia. El que es sensible a los cambios de H^+ casi siempre es denominado electrodo de vidrio. El alambre que existe en el compartimento interno del electrodo se pone en contacto con una disolución de una concentración conocida y fija de H^+ . La pared del compartimento está formada de un vidrio delgado especial que es permeable a los H^+ . Como resultado de esto, el voltaje que se genera en un electrodo unido al electrodo de referencia, depende de los $[H^+]$ que se encuentran en la disolución.

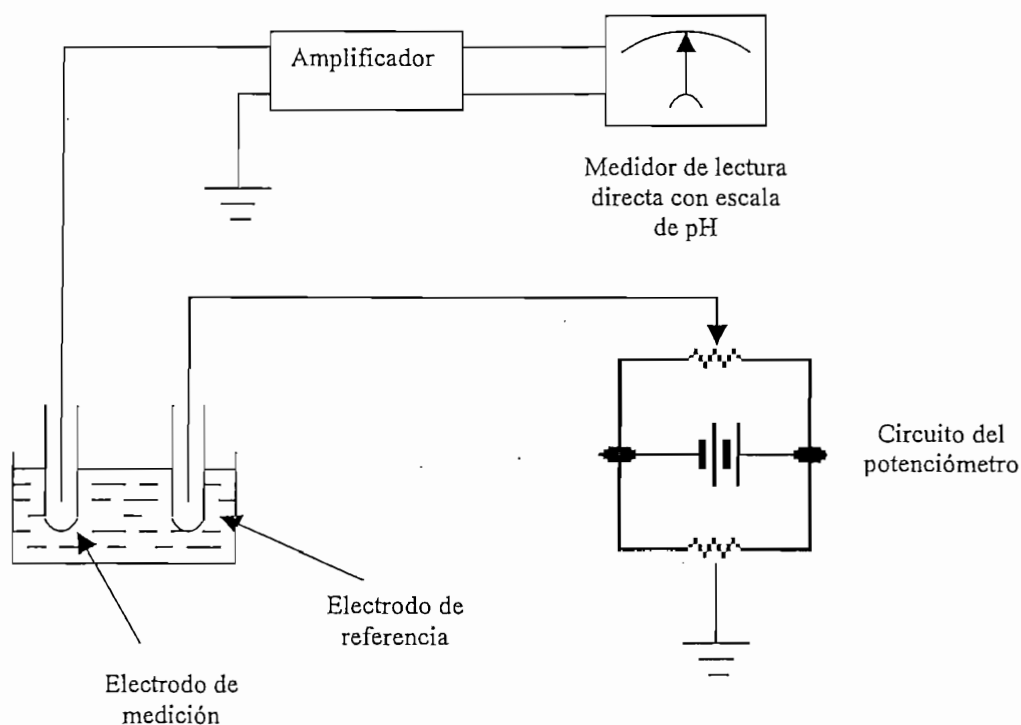


Figura 1.4 Circuito de un pH - metro

Debido a que los pH metros se utilizan ampliamente, muchos investigadores han desarrollado electrodos que pueden utilizarse en pequeñas cantidades de disolución.

Actualmente es posible insertar electrodos en células vivas para registrar el pH del medio celular. El medidor de pH se utiliza también fuera de los laboratorios. Los modelos de bolsillo se encuentran disponibles para utilizarse en algunos estudios, registrando los afluentes industriales y en trabajos agrícolas.

1.3.4.1 Celdas de referencia

Los dos tipos de celdas de referencia que tienen la mayor cantidad de aplicaciones son:

- Celda de calomelanos (uso más difundido).
- Celda de plata - cloruro de plata -.

Estas celdas son estables y no cambian con el pH en la muestra que se está midiendo. Las dos celdas de referencia son ilimitadas en lo que respecta a referencias de pH, y se pueden emplear con cualquier electrodo sensible al pH. Estas celdas de referencia operan a la presión atmosférica. En la Figura 1.5 y Figura 1.6 se pueden observar la construcción de la celda de calomelanos y la celda de plata –cloruro de plata- respectivamente.

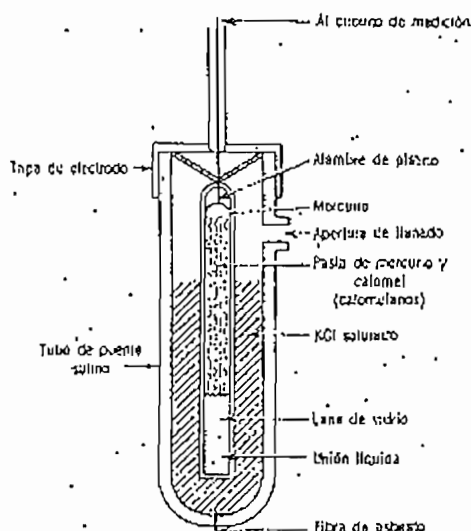


Figura 1.5 Corte transversal de un electrodo de referencia de pH de calomelanos

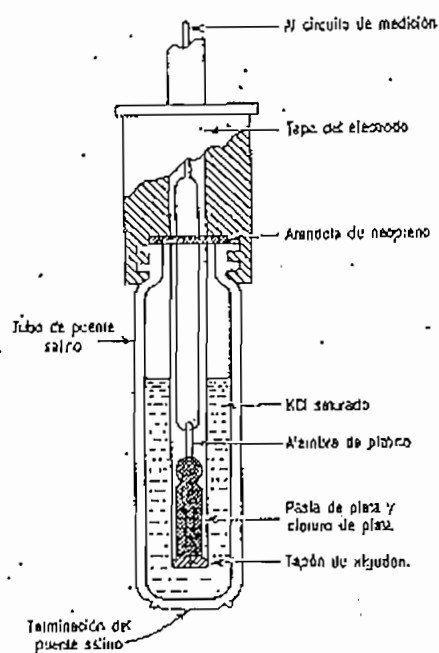


Figura 1.6 Corte transversal de un electrodo de referencia de pH de plata-cloruro de plata-

1.3.4.2 Puentes Salinos

En las celdas de referencia estándar, la conexión eléctrica que se halla entre la solución en la que se pone la referencia y el cloruro de potasio saturado del estándar, se hace a través de un puente salino. Los puentes son utilizados de tal modo que exista un mínimo de dilución de la solución del puente salino y un mínimo de difusión del cloruro de potasio hacia la solución salina o de la solución salina hacia el cloruro de potasio o la solución que se está midiendo.

Los puentes salinos tienen una barrera en el punto de terminación con la solución externa, por ejemplo, la fibra de asbesto que se muestra en la Figura 1.5 y el capilar de la Figura 1.6. Otras barreras son tapones de agar-agar, tapones de vidrio molido, cerámica porosa y fibra de vidrio. Las barreras son usadas para proporcionar velocidades elevadas de flujo a pequeños volúmenes con el objeto

de prevenir una dilución excesiva y la contaminación de las soluciones que se miden.

1.3.5 CELDAS DE MEDICIÓN

Existen cuatro tipos de electrodos:

- Electrodo de vidrio
- Electrodo de antimonio
- Electrodo de quinhidrona
- Electrodo de hidrógeno

Su elección depende de la aplicación que se trate. Estos cuatro tipos satisfacen la mayoría de los requisitos industriales.

1.3.5.1 Electrodo de Vidrio

Los electrodos de vidrio pueden abarcar el rango comprendido entre 0 y 13 pH, operar a temperaturas de 0 a 100° C y a presiones de 0 a 100 lb/plg². A estos electrodos no les afectan los ácidos oxidantes pero, pueden ser atacados por soluciones de fluoruros. No les afectan los gases disueltos o sólidos suspendidos en las soluciones y funcionan bien en flujos de fluidos, excepto a altas velocidades.

El vidrio es un buen dieléctrico, por ello, el bulbo de vidrio sensible al pH se hace lo suficiente poroso para obtener la conductividad eléctrica de la solución tampón que está en el interior de la cápsula de vidrio del electrodo y de la solución dentro de la que se coloca éste para hacer la medición del pH.

En la Figura 1.7 se observa este electrodo.

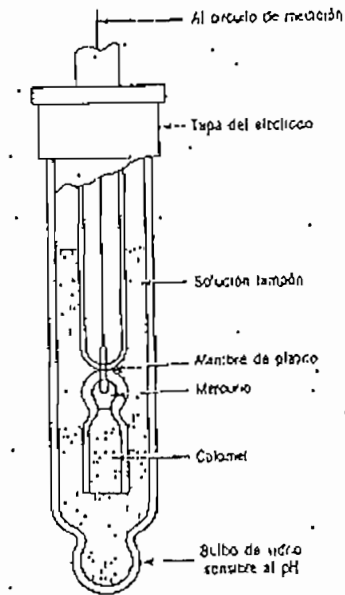


Figura 1.7 Sección transversal de un electrodo de vidrio sensible al pH.

El vidrio tiene una resistencia interna elevada, por lo que se requiere una protección debido a la impedancia; pero la resistencia eléctrica de aislamiento es excelente. Estos electrodos están sujetos a error en soluciones alcalinas muy concentradas.

Este tipo de electrodos vienen sellados para reducir corrientes de fuga y para eliminar las operaciones de relleno.

1.3.5.2 Electrodos de Antimonio

Abarcan el rango comprendido de 4 a 11.5 pH y su temperatura de operación no debe sobrepasar los 60° C. La celda del electrodo tiene una resistencia baja, no requiere cubierta y no es necesario tener circuitos de medición especiales. Su superficie interna se debe limpiar y raspar con regularidad. Ciertos materiales como la plata, el mercurio, el plomo y el cobre, contaminan el electrodo y algunas soluciones oxidantes y reductoras causan errores en las mediciones.

Cuando se emplean con celdas de referencia de calomelanos, los valores no son precisos. Para lograr mediciones exactas, se requiere la estandarización con soluciones cuyo pH se conoce.

1.3.5.3 Electrodo de Quinhidrona

Tienen un rango de pH limitado y se deben usar a temperaturas inferiores a 37°C. Este tipo de electrodos liberan un número equivalente de iones de hidrógeno conforme se van oxidando. El cambio de voltaje del sistema reacciona como respuesta a la concentración de iones de hidrógeno. Estos electrodos no son apropiados para aplicaciones industriales, pues pueden cambiar el pH de las soluciones tamponadas que se miden. No se pueden usar en soluciones alcalinas o en presencia de agentes fuertemente oxidantes o reductores.

1.3.5.4 Electrodo de Hidrógeno

Estos electrodos se emplean a presión atmosférica, tienen un rango de pH ilimitado y operan a todas las temperaturas razonables hasta el punto de ebullición de la solución cuyo pH se está determinando. Estos electrodos no son útiles en presencia de agentes oxidantes y reductores, son lentos para alcanzar el equilibrio.

La construcción de un electrodo de hidrógeno es muy semejante a un tubo de ensayo invertido con un vástago central de vidrio a cuyo través pasa un alambre de platino. La lengüeta de platino se fija al extremo de este alambre y se recubre con negro de platino para incrementar el área de superficie. Los electrodos de hidrógeno se pueden utilizar como referencia si se sumergen en una solución con una concentración de iones de hidrógeno de 1 mol/litro y se mantiene un flujo de gas hidrógeno a una atmósfera. El contacto con la solución de prueba se hace a través de un puente salino.

1.3.6 SISTEMA DE MEDICIÓN DE pH

Un sistema completo de medición de pH incluye:

- una celda electroquímica
- un circuito electrónico
- dispositivo de lectura

La celda electroquímica se compone del electrodo de referencia, de un puente salino que conecta a éste con la solución que se mide, de la solución de muestra medida, de la membrana, la solución de relleno y la celda interna del electrodo de vidrio. La medición de voltaje a través de esta celda total sirve como indicación del pH, aunque se trata de la suma algebraica de todos los voltajes del sistema. En realidad, este voltaje se genera debido al flujo de electrones dentro del sistema y es una buena medición del pH, ya que las condiciones se mantienen de manera que la única variable es la dirección de pH en la membrana del electrodo de vidrio. Los otros voltajes son mínimos o valores uniformes para un conjunto de condiciones dadas. La función primaria de un electrodo de pH sensible es producir un cambio de voltaje de 59.1 milivolts = 1.00 pH a 25° C. También es conveniente ajustar la composición de la solución interna de la celda que es sensible al pH para que la diferencia de voltaje entre el electrodo sensible al pH y la celda de referencia sea cero para un valor de pH de 7.00. En la mayoría de las aplicaciones comerciales se ha escogido el valor de pH de 7.00 para representar una solución neutra (ejemplo: agua destilada).

Existen dos tipos generales de sistemas electrónicos de medidores de pH, en atención a la forma de lectura:

- sistema del tipo nulo
- sistema del tipo de lectura directa

Las lecturas nulas se pueden obtener con suma facilidad empleando un circuito potenciométrico. El alambre corredizo del potenciómetro se mueve hasta

obtener un voltaje de compensación igual al que se desarrolla en la escala electroquímica. El alambre corredizo se marca en unidades de pH y el valor de este factor se lee directamente en el indicador deslizante del alambre corredizo del potenciómetro cuando el medidor indicador señala la condición nula.

Este sistema se muestra en la Figura 1.8

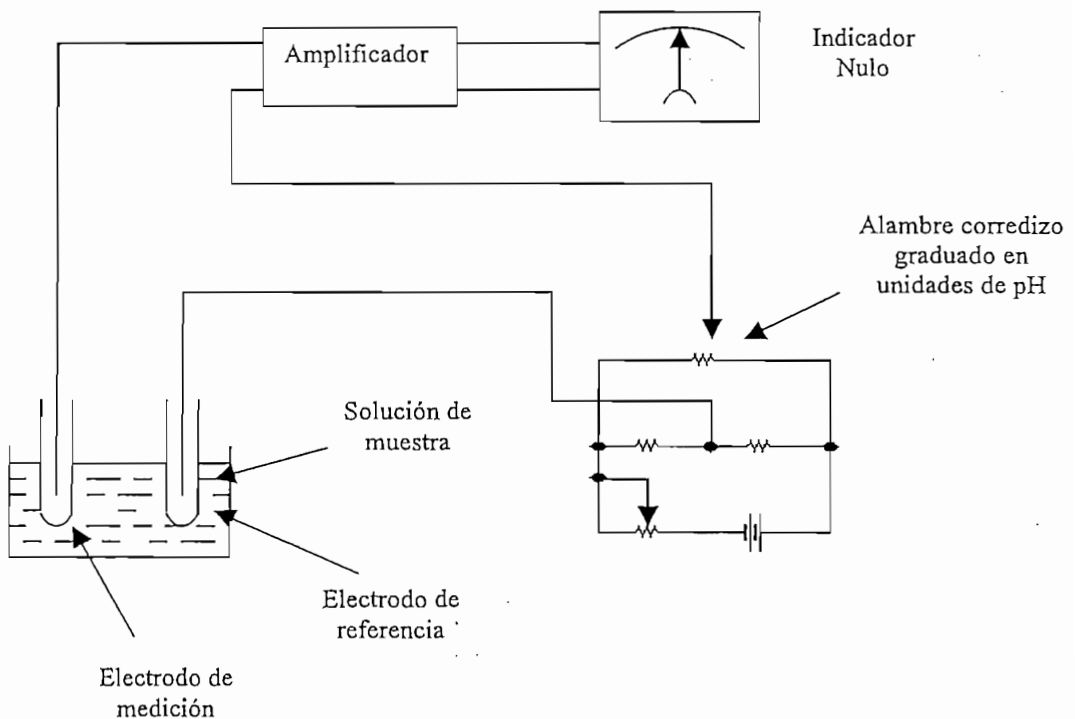


Figura 1.8 Esquema de un medidor típico de pH, con brazo corredizo y balance nulo

En el sistema del tipo de lectura directa los medidores de pH de este tipo pueden ofrecer la mayor precisión que existe para mediciones de pH. Tanto la temperatura como la asimetría entre los tubos de electrodo son fuentes de error en las mediciones de pH, de manera que la mayoría de los circuitos proporcionan un medio de compensación o de corrección. En el circuito potenciométrico se hace que una porción del alambre corredizo sea variable con el objeto de

compensar los cambios de temperatura, y también se puede proveer una característica de corrección para compensar el voltaje de asimetría, que se define como aquel que se requiere para obtener una lectura cero cuando se colocan electrodos y soluciones idénticas a ambos lados de la membrana de vidrio. La asimetría se origina debido a las pequeñas variaciones presentes en los electrodos comerciales existentes.

1.3.7 EL pH EN LAS PLANTAS

Los factores que afectan al pH.

1. El suelo o substrato
2. La calidad del agua
3. Los fertilizantes
4. Las mismas plantas

1.3.7.1 El pH del suelo

El pH del suelo es una de las propiedades que tiene mayor influencia sobre su comportamiento en relación con el crecimiento de las plantas, y es al mismo tiempo una de las más fáciles de determinar, por lo que constantemente aparece reportada en cualquier análisis de rutina.

Las variaciones del pH del suelo afectan la disponibilidad de los diferentes elementos nutritivos esenciales para las plantas, tienen influencia sobre las poblaciones y composición de los microorganismos del suelo, son determinantes de la presencia o no de factores tóxicos para las plantas, influyen en los cambios que experimenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo por la presencia de cargas variables dependientes del pH, etc. El pH es por lo tanto una orientación para indicar cuales son los nutrientes que pueden encontrarse en estado deficitario. Ante el problema del pH que puede bloquear los nutrientes, el

agricultor tiene dos alternativas: aplicar enmiendas para llevar el suelo a un pH adecuado, o proporcionarle suficientes fertilizantes para reparar la deficiencia a pesar del pH.

Si una planta está en un sustrato con un pH inadecuado, pueden sobrevenir problemas de deficiencias o toxicidades (por exceso causado por desequilibrios) de los nutrientes.

Algunos problemas causados por un pH inadecuado son:

Por pH demasiado bajo

- Toxicidad: Fe, Mn, Zn, Cu
- Deficiencia: Ca, Mg, Mo
- Riesgo toxicidad: NH₄
- Lavado: PO₄

Por pH demasiado alto:

- Deficiencia: Fe, Mn, Zn, Cu, B
- Toxicidad: Mo

El pH óptimo para la mayor parte de las plantas está entre 5,4 y 6,8 (7 = neutro), o sea que casi todas prefieren un medio ácido. Algunas plantas (azaleas, rhododendros, gardenias, hydrangeas, etc.) prefieren suelos con pH comprendido entre 4,5 y 5,5 o sea, más ácidos. Existen también algunas plantas que prefieren suelos de reacción algo alcalina.

En la Tabla 1.7 se muestra el pH recomendado para diferentes especies de plantas.

ESPECIE	PH RECOMENDADO	PARA EVITAR
Anthirrinum	5,4-5,8	Fe & B def.
Azalea	4,5-5,8	Fe def.
Calendula	6,0-6,8	Fe & Mn tox.
Celosía	6,0-6,8	Fe & Mn tox.
Clavel – Dianthus	6,0-6,8	Fe & Mn tox.
Geranio	6,0-6,8	Fe & Mn tox.
Hydrangea (azul)	5,2-5,6	Fe def.
Hydrangea (rosa)	5,8-6,2	Fe def.
Lilium longiflorum	6,5-6,8	Fe tox. & Ca def.
Petunia	5,4-5,8	Fe & B def.
Salvia	5,4-5,8	Fe & B def.
Vinca	5,4-5,8	Fe & B def.
Viola wittrockiana	5,4-5,8	Fe & B def.

Tabla 1.7 pH recomendado para algunas especies

1.3.7.2 La calidad del agua de riego

Si el agua de riego es de buena calidad puede producir una mejoría en la tierra en que se aplica debido al calcio que contiene y al efecto benéfico derivado del desleimiento o lavado de cualquier exceso de sales de la tierra, pero si la calidad del agua es inapropiada, la tierra puede deteriorarse hasta quedar imposibilitada para producir cosechas satisfactorias.

El agua suele contener bicarbonatos (cálcico, sódico, magnésico) y carbonatos (cálcico) que elevan el pH de los substratos. Cuando se habla de alcalinidad del agua no se hace referencia a su pH sino a su capacidad para neutralizar un ácido (a su capacidad para neutralizar un substrato por el efecto

amortiguador o tampón de sus carbonatos) y se mide por la cantidad de ácido que sería necesario añadirle para variar su pH.

Se puede dar el caso paradójico de medir un pH ligeramente ácido en el agua potable (debido a la presencia de cloro para su desinfección) mientras que la misma agua, utilizada en el riego, eleva el pH del substrato debido a la presencia de carbonatos no neutralizados.

El agua ideal para el riego de las plantas sería el agua de lluvia no contaminada. El agua de lluvia no contiene sales en disolución - quizás tan solo un poco de polvo inerte, y está ligeramente acidulada con ácido carbónico (CO_2H) que es el que reacciona con el calcio del suelo, creando bicarbonato y carbonato cálcico, que es arrastrado por el agua y, en algunos casos, llega a formar fantásticas grutas con estalactitas y estalagmitas. El único problema originado por la lluvia en este caso es el de la progresiva acidificación del suelo, que se puede corregir con encalados. Actualmente, en zonas contaminadas, la lluvia contiene otros compuestos químicos generados por el hombre - típicamente ácido sulfúrico o ácido nítrico, entre otros, procedentes de la contaminación industrial. El agua se torna demasiado ácida, devastando bosques enteros.

El agua disponible para el riego procede normalmente de ríos, lagos o pozos. Este agua suele contener una gran cantidad de compuestos diversos, principalmente de calcio. Este tipo de agua se denomina "dura". El riego continuado con agua dura tiende a elevar el pH del substrato, lo cual es perjudicial para muchas plantas.

Además de lo anterior, en zonas costeras el agua suele contener algo de sal común o cloruro sódico ClNa . Si el caso no es muy grave, el exceso de sodio (del ClNa) se puede corregir añadiendo yeso o sulfato cálcico $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ al suelo. El yeso tiene la ventaja de no desviar el pH. El agua de riego suele contener algo de cloro (gas o hipoclorito sódico), para su desinfección cuando se destina al consumo humano. Este cloro le confiere un carácter ligeramente ácido que enmascara la alcalinidad del agua, sin neutralizarla. En las mediciones

conviene dejar reposar este tipo de agua para que el cloro desaparezca. El hecho de regar con agua clorada no perjudica demasiado las plantas. Este cloro es muy volátil y está en cantidades ínfimas.

El agua embotellada puede tener mejor sabor pero ello no constituye una garantía de su calidad para las plantas. Precisamente muchas aguas embotelladas tienen un alto contenido de bicarbonatos y carbonatos, que son los que elevan el pH del sustrato.

Se ha realizado el esfuerzo de ajustar el pH de un sustrato a un valor (generalmente comprendido entre 5,4 y 6,8) es lógico que se quiera regar con agua que no desbarate los esfuerzos hechos. El pH del sustrato se ve afectado por la calidad del agua que se utiliza para su riego. Es necesario, pues, añadir un ácido al agua para ajustar su pH al valor deseado. Los ácidos más empleados son el sulfúrico SO_4H_2 y el nítrico NO_3H . El ácido cítrico también ha sido empleado con éxito aunque su elevado precio impide su utilización en cultivos comerciales.

Los productos que acostumbra a llevar el agua en disolución, que contribuyen mayormente a su alcalinidad son:

- Bicarbonatos como:
 - Bicarbonato cálcico
 - Bicarbonato sódico
 - Bicarbonato de magnesio

- Carbonatos como:
 - Carbonato cálcico

Contribuyen en la alcalinidad en menor escala:

- Hidróxidos

- Amoníaco
- Boratos
- Bases orgánicas
- Fosfatos
- Silicatos

La alcalinidad puede ser un problema con niveles superiores a 1,5 ó 2 meq/l. Si es superior a estos valores, se hace recomendable inyectar un ácido para que se neutralicen los carbonatos evitando así una subida indeseada del pH del sustrato. La alcalinidad es la cantidad de ácido que hay que añadir para cambiar el pH. La prueba se realiza dosificando un ácido (generalmente sulfúrico) a una muestra del agua, hasta alcanzar un valor de pH que haga cambiar de color un reactivo de prueba. Existen diferentes kits en el mercado.

Una vez conocido el valor de la alcalinidad se puede entrar en un sistema de cálculo para determinar la cantidad de ácido sulfúrico, nítrico o fosfórico que conviene añadir. El sistema de cálculo también tendrá en cuenta la adición de fertilizantes y su efecto en el pH. Este tipo de análisis puede ser engorroso para un aficionado quien, además, probablemente no sepa que hacer con el valor medido ya que presumiblemente no disponga del sistema de cálculo. En este caso lo mejor que se puede hacer es almacenar el agua en un depósito, añadir un poco de ácido, remover, y medir el pH al día siguiente. El pH medido deberá ser igual al pH objetivo del sustrato. Si el valor no es el adecuado, corregir y volver a medir al otro día. Al cabo de unos cuantos ensayos ya habrá adquirido algo de práctica. Hay que tener en cuenta que el suministro de agua puede no ser uniforme, por lo que siempre hay que medir.

Un ácido adecuado puede ser el sulfúrico diluido que se comercializa para las baterías de los coches. Por motivos de seguridad personal, hay que añadir el ácido al agua, nunca el agua al ácido. También se debe utilizar protecciones personales: gafas, guantes y delantal.

1.3.7.3 Influencia de los fertilizantes en el pH del sustrato

Los granulados de empleo común, además de los fertilizantes simples, también ejercen grandes influencias sobre el pH del sustrato. Productos similares de diferentes fabricantes pueden diferir considerablemente en estos efectos. Si el fabricante no ofrece información precisa será necesario efectuar varios ensayos de prueba y error para poder controlar de forma exacta el pH del sustrato. Esto adquiere especial relevancia para los productores de plantas.

1.3.7.4 Influencia de las plantas en el pH del sustrato

Curiosamente, o quizás no tanto, ciertas plantas más que otras desvían el pH del sustrato, a veces hacia valores que le son perjudiciales!. Esto se refiere siempre a cultivo en contenedor de pequeñas dimensiones. En grandes contenedores o en el suelo el efecto pasa prácticamente desapercibido.

Por ejemplo, la Celosía, el Clavel (*Dianthus*), el Tomate y la Begonia tienden a bajar el pH. La Vinca, la Caléndula y la Zinnia tienden a subirlo, a pesar de que crecen mejor en un pH más bajo.

1.4 TRANSMISORES

1.4.1 GENERALIDADES

Los transmisores son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Los transmisores pueden trabajar con varios tipos de señales: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas siendo las tres primeras las más empleadas en la industria. Las

señales hidráulicas se utilizan cuando se necesita una gran potencia y las señales telemétricas se emplean cuando hay una distancia de varios kilómetros entre el transmisor y el receptor.

Este proyecto nos centrará en los transmisores electrónicos, los mismos que generan la señal estándar de 4-20 mA c.c. ò 0-10 V c.c. a distancias de 200m a 1Km según sea el tipo de instrumento transmisor. Todavía se encuentran transmisores que envían señales, 1-5 mA c.c., 0-5 mA c.c, 0-20 mA c.c, 1-5 V c.c, que se utilizaban anteriormente en reemplazo de la señal normalizada indicada de 4-20 mA.

La señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corrientes parásitas, emplea sólo dos hilos que no precisan blindaje y permite actuar directamente sobre miliamperímetros, potenciómetros, calculadores analógicos, etc. sin necesidad de utilizar rectificadores ni modificar la señal.

La relación de 4 a 20 mA c.c. es de 1 a 5 la misma que la razón de 3 a 15 psi en la señal neumática y el nivel mínimo seleccionado de 4mA elimina el problema de la corriente residual que se presenta al desconectar los circuitos a transistores. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el panel de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor.

El "cero vivo" con que empieza la señal (4mA c.c.) ofrece las ventajas de poder detectar una avería por corte de hilo (la señal se anula) y de permitir diferenciar todavía más el "ruido" de la transmisión cuando la variable está en su nivel más bajo.

Las fibras ópticas en la transmisión se están utilizando en lugares en donde las condiciones son duras (campos magnéticos intensos que influyen sobre la señal). Los módulos de transmisión pueden ser excitados por fuentes de luz de LED (Light Emitting Diodes) o diodo láser. Los LED son de mayor fiabilidad, y

aunque no sean tan potentes como los diodos láser, pueden enviar la señal hasta una distancia de 1.8Km, lo cual es suficiente en la mayoría de las plantas industriales. El tiempo medio entre fallos de los LED (montados con los conjuntos optoelectrónicos) es de 125.000 horas, mientras que el de los diodos láser es de 8000 horas. Los módulos receptores disponen de fotodetector y preamplificador, con los cables o multicables de fibra óptica y con convertidores electroópticos. La transmisión de datos puede efectuarse con multiplexores transmitiendo simultáneamente a la velocidad máxima definida por la norma RS232 de transmisión de datos para modems y multiplexores. Las ventajas de la transmisión por fibra óptica incluyen la inmunidad frente al ruido eléctrico (interferencias electromagnéticas), el aislamiento eléctrico total, una anchura de banda mayor que la proporcionada por los correspondientes hilos de cobre, ser de pequeño tamaño y de poco peso, sus bajas pérdidas de energía, y que las comunicaciones sean seguras. Es de esperar que las fibras ópticas encontrarán nuevas aplicaciones en la industria a medida que se abarate su coste y ganen en seguridad de funcionamiento. No debe olvidarse que la industria es muy conservadora y sólo aplica las técnicas que están muy probadas y que funcionan con seguridad sin apenas fallos.

El microprocesador se utiliza en la transmisión por las ventajas que posee de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, fiabilidad, precio cada vez más competitivo y ser apto para realizar cálculos adicionales. Por ejemplo, para la típica compensación del nivel considerando la presión, la temperatura y la forma del tanque; compensación de la conductividad y pH considerando la temperatura; y para la determinación del caudal masa a partir el caudal volumétrico, la presión y la temperatura. Gracias a estas características de cálculo, los instrumentos que las incorporan reciben el nombre de "inteligentes".

El microprocesador ha permitido, a partir de 1986, la aparición del primer transmisor con señal de salida enteramente digital, lo cual facilita las comunicaciones enteramente digitales entre el transmisor y el controlador o receptor. Esta digitalización de las señales, si bien es diferente en cada fabricante

de instrumentos, está experimentando un proceso de normalización a cargo del Comité SP50 de ISA.

En la Tabla 1.8 se pueden ver una comparación entre señales neumáticas y electrónicas correspondientes a los valores de la variable de medida más utilizados en calibración. En la Tabla 1.8 se puede notar que el nivel mínimo de la señal permite calibrar correctamente el instrumento, comprobar su correcta calibración y detectar fugas de aire en los tubos de enlace con los demás instrumentos neumáticos o el corte de un hilo en el caso de instrumentos electrónicos.

Variable medida %	Señal neumática		Señal electrónica								
	psi	Bar (Kg/cm ²)	MA				V				
			mA c.c.				V c.c				
0	3	0.2	4	1	10	0	0	1	0	0	0
25	6	0.4	8	2	20	1.2	5	2	2.5	12.	25
50	9	0.6	12	3	30	5	10	3	5	5	50
75	12	0.8	16	4	40	2.5	15	4	7.5	25	75
100	15	1	20	5	50	3.7	20	5	10	37.	100
						5				5	0
						5				50	

Tabla 1.8 Comparación entre señales de transmisión neumáticas y electrónicas

1.4.2 TRANSMISORES ELECTRÓNICOS

Entre los transmisores electrónicos se tiene:

- Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas.

- Detector de posición de inductancia.
- Transformador diferencial

- Transmisor Inteligente.

El transmisor electrónico se comporta esencialmente como una resistencia variable intercalada en un circuito que contiene una fuente de tensión continua y un receptor con su carga correspondiente, tal como se observa en la Figura 1.9.

Existen varios tipos de circuitos corriente-corriente y corriente-tensión según sea que el receptor capte corriente o tensión, respectivamente, y además los receptores pueden estar en paralelo o en serie en el circuito (Figura 1.8 a, b, c, d).

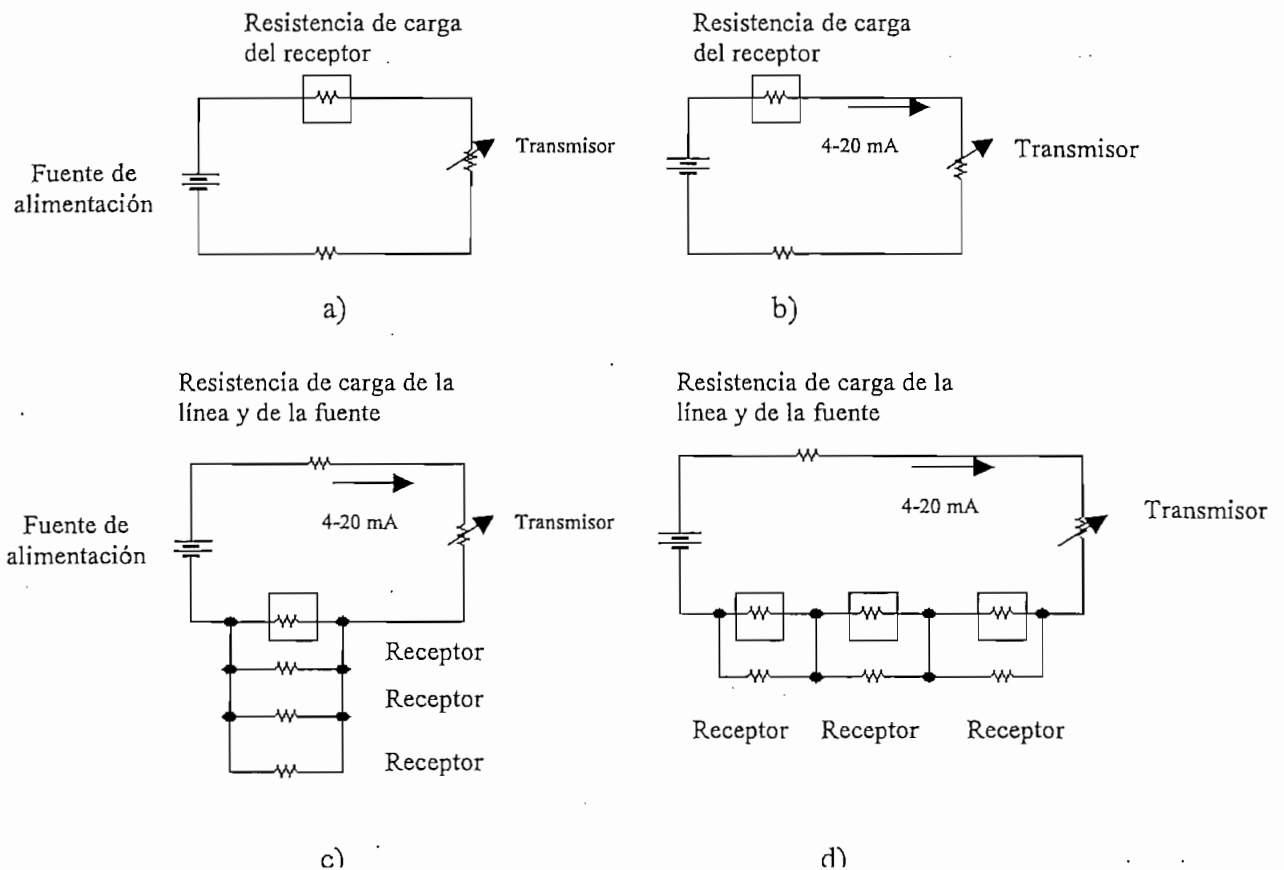


Figura 1.9 Circuitos típicos de los transmisores electrónicos

La longitud de la línea entre el transmisor y el receptor dependerá de los valores de la resistencia de carga del receptor, de la impedancia del receptor y de la f.e.m. de la fuente de alimentación (suele ser de 24V c.c. o de 42 V c.c.). Sin embargo, no se presentan problemas de limitación de longitud a no ser que la distancia que separa el transmisor del receptor sea de varios kilómetros o bien que existan varios receptores conectados a un solo transmisor.

1.4.2.1 Transmisor Inteligente

Hacia 1983 la firma Honeywell presentó en el mercado el primer transmisor denominado "inteligente" (smart transmitter). Consiste en un transmisor electrónico de puente de Wheatstone aplicable a la medida de presión, presión diferencial y nivel, formado por una pastilla de silicio difundido en el que se hallan embebidas las resistencias R_a , R_b , R_c , R_d de un puente de Wheatstone. El desequilibrio del puente originado por cambios en la variable, da lugar a una señal de salida de 4-20 mA c.c.

El término "inteligente" indica que el instrumento es capaz de realizar funciones adicionales a la de la transmisión de la señal del proceso, gracias a un microprocesador incorporado. El microprocesador compensa las no linealidades de los elementos o sensores individuales, convierte las señales analógicas a digitales y calcula, mediante datos prefijados en fábrica y almacenados en su memoria, un valor digital de salida que es transformado a la señal de salida analógica de 4-20 mA.

El instrumento proporciona la posibilidad de calibración tanto de EC como pH, así como la compensación la temperatura en los niveles de EC. Antes, la calibración debía realizarse normalmente en el taller de instrumentación, lo que equivalía a disponer de aparatos de repuesto para continuar trabajando con el proceso, siendo inevitable la marcha a ciegas durante el tiempo requerido para el cambio mecánico del instrumento (a no ser, naturalmente, que se dispusiera de un instrumento doble).

Los transmisores inteligentes disponen también de autocalibración, es decir, suplen las operaciones del ajuste del cero y del 100 de los instrumentos, trabajo desarrollado clásicamente por los instrumentistas.

CAPITULO 2



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TRANSMISOR DE ELECTROCONDUCTIVIDAD Y pH

CAPITULO 2.

En el capítulo anterior se realizó una descripción de las variables a ser medidas por el transmisor. Es el objetivo de este capítulo diseñar y construir los circuitos de: acondicionadores de señal, sistema de medición y transmisión de señales.

Para comprender mejor el alcance de este trabajo, en la Figura 2.1 se muestra en un diagrama de bloques generalizado el transmisor de EC y pH

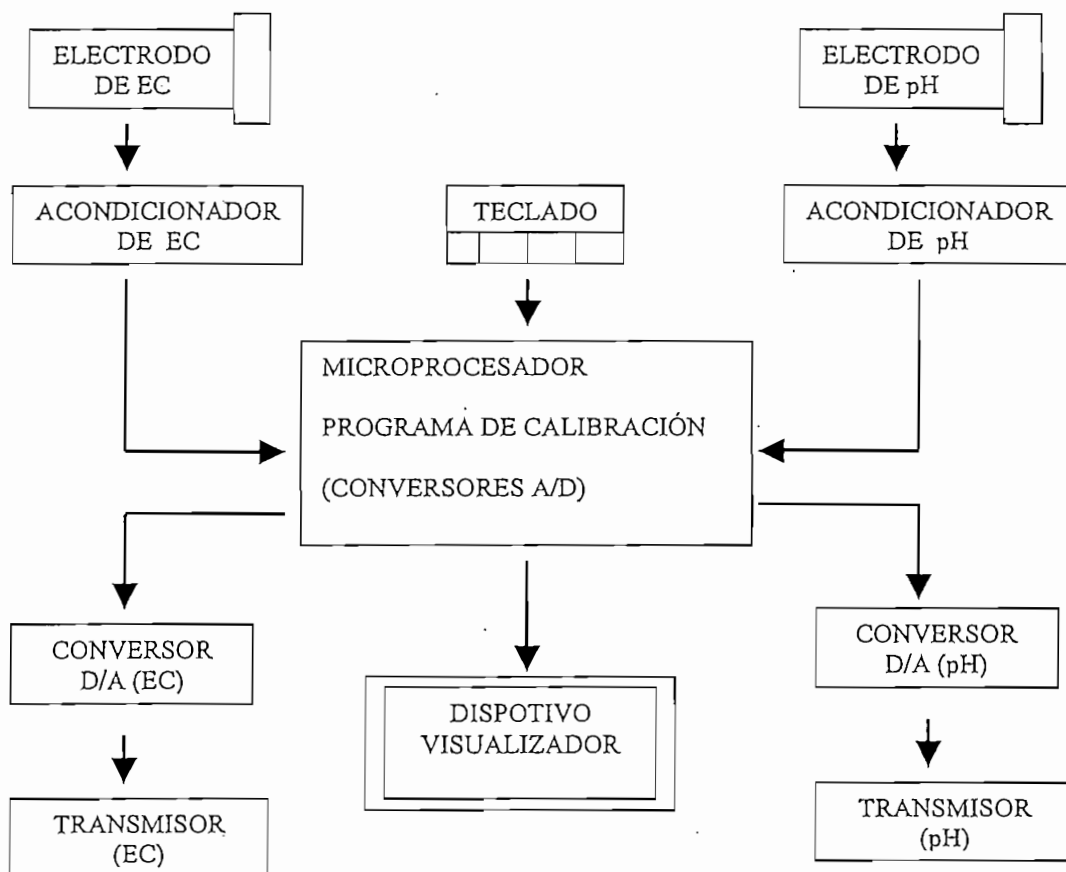


Figura 2.1 Diagrama del transmisor de EC y pH

- **ELECTRODOS DE EC Y pH:** Convierten la magnitud que se desea medir en una salida eléctrica utilizable.
- **ACONDICIONADORES DE EC Y pH:** Convierten la salida de los electrodos de EC y pH en una magnitud eléctrica a las exigencias de entrada del microprocesador.
- **MICROPROCESADOR:** La función del microprocesador es convertir las señales analógicas provenientes de los acondicionadores, manejar el teclado, el dispositivo visualizador, realizar la autocalibración, y enviar los datos hacia el transmisor.
- **CONVERSORES D/A:** Convierte las señales digitales provenientes del microprocesador a señales analógicas adecuadas para enviarlas al circuito transmisor.
- **TRANSMISOR:** Transmite las magnitudes de proceso a distancias, a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos.
- **DISPOSITIVO VISUALIZADOR:** Visualiza la información requerida acerca de las magnitudes que se miden.
- **TECLADO:** Constituido por las teclas: *ESC, MENU, SELECT, ENTER*.

A continuación se procede a detallar los circuitos diseñados para cada una de las etapas que componen el transmisor de EC y pH. La primera etapa está constituida por los acondicionadores de señal de EC y pH, la segunda etapa la compone el centro de procesamiento de datos constituido por el microprocesador, el dispositivo visualizador y el teclado; y una tercera etapa constituida por la transmisión de datos a través de un lazo de corriente (4 – 20 mA).

En cada etapa se dará una explicación sobre los circuitos integrados utilizados, cuya información está complementada con las hojas de datos de los mismos que se incluyen en los ANEXOS.

2.1 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ACONDICIONADORES DE SEÑAL

Para el diseño de los acondicionadores de señal de EC y pH, se utilizará el C.I. AD620, que es un amplificador de instrumentación, por ello a continuación se realizará una explicación de dicho circuito integrado.

2.1.1 CIRCUITO INTEGRADO AD620

El C.I. AD620 es un amplificador de instrumentación de bajo costo, que requiere solamente una resistencia externa (R_G), para tener ganancias de 1 a 1000. La Figura 2.2 muestra el C.I. AD620.

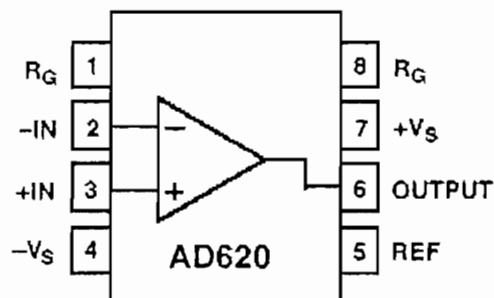


Figura 2.2. Circuito Integrado AD620.

A continuación se resumen las características principales del amplificador de instrumentación AD620.

- Rango de ganancia de 1 a 1000, con resistencia externa R_G .
- Rango de polarización: ± 2.3 V a ± 18 V.
- Mejores características que un diseño con 3 amplificadores operacionales.
- Consumo de corriente máxima de 1.3mA.
- 120 kHz Ancho de Banda ($G = 100$).
- Puede operar entre -40°C y 80°C .
- Disponible en un Integrado de 8 pines.

En los Anexos, se muestra la hoja de datos del C.I. AD620.

La Figura 2.3 muestra el circuito interno del amplificador de instrumentación. La ganancia del amplificador viene dado por la Ecuación 2.1 ^{2.1}

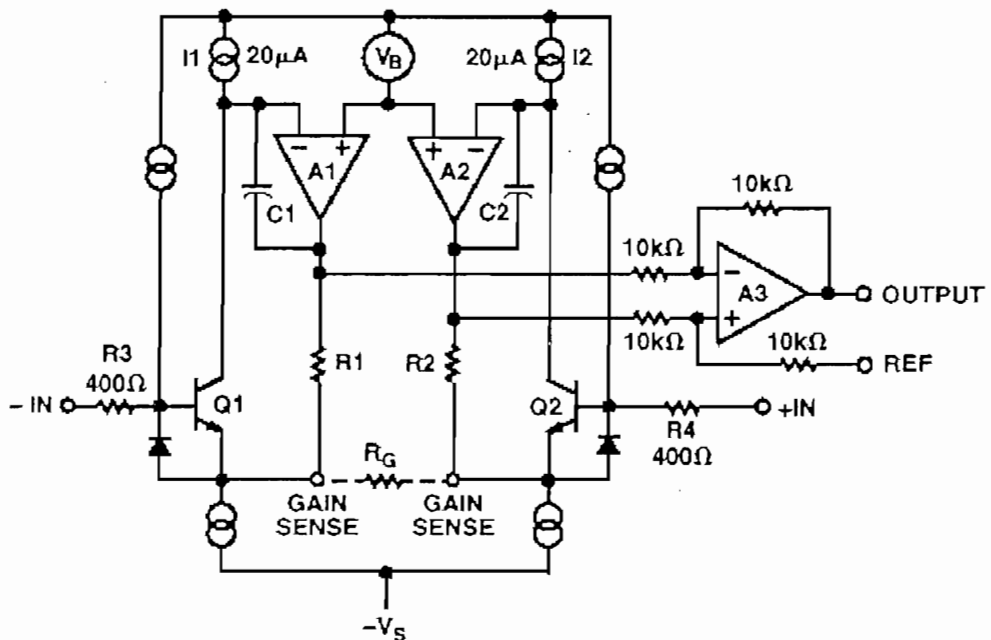


Figura 2.3. Circuito Interno del C.I. AD620

^{2.1} ANALOG DEVICES. INSTRUMENTATION AMPLIFIER AD620. PG. 10

$$G = \frac{R1 + R2}{R_G} + 1 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Las resistencias internas R1 y R2 tienen un valor de 24.7 K Ω . Reemplazando estos valores en la Ecuación 2.1, se obtiene la Ecuación 2.2:

$$G = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{R_G} + 1 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

El potencial del terminal de referencia (Pin 5) define el cero del voltaje de salida. Esto provee de una inyección de voltaje offset a la salida, con un rango disponible de 2V dentro del voltaje de la fuente.

2.1.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACONDICIONADOR PARA EL ELECTRODO DE pH

Aunque la variación en mV por unidad de pH es relativamente grande (59mV), la alta resistencia del circuito de los electrodos aconseja utilizar un amplificador de pH que por las características del circuito debe poseer una alta impedancia de entrada, un bajo nivel de ruido para disminuir los errores, y opcionalmente un aislamiento de señal entre la entrada y la salida para eliminar los bucles de masa ya que la unión de referencia está al potencial de masa.

Con estas recomendaciones el sistema de medición aquí propuesto de pH consta de las siguientes partes: un electrodo sensor, un medidor de pH (o de iones) que contiene un acoplador de impedancias (con alta impedancia de entrada), y un amplificador de instrumentación con corrección offset y pendiente. Las lecturas de voltaje del acondicionador ingresarán hacia el microcontrolador, y los valores de pH, se visualizarán en la pantalla LCD, y se transmitirán.

La necesidad de la compensación automática de temperatura depende de la exactitud requerida de una lectura del pH. Las lecturas del pH varían con la temperatura. Por ejemplo, una muestra con un pH de 7 en 25°C, puede tener un pH de 7,08 en 5°C y un pH de 6,98 en 60°C. La exactitud de nuestras lecturas son de 0.1 pH, por ello se ha optado por hacer las lecturas sin compensación de temperatura.

El circuito acondicionador de pH, debe entregar un voltaje entre 0V y 5V, para todo el rango (0-14). El microcontrolador es el encargado de establecer los valores de pH para cada valor de voltaje, y no necesariamente 0V corresponde un valor de pH = 0, o 5V un pH = 14.0. Con la calibración del offset y la pendiente en el amplificador de instrumentación, se obtendrá el rango de voltaje para toda la escala de pH (el rango será entre 0V y 5V). En la Figura 2.4 se muestra en un diagrama de bloques el circuito acondicionador para el electrodo de pH.

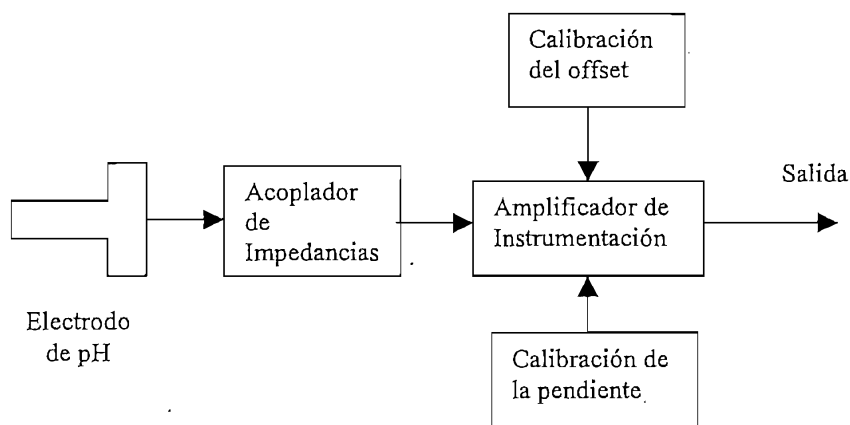


Figura 2.4. Diagrama de bloques del Circuito Acondicionador de pH

- **ELECTRODO DE pH:** Celda electroquímica que entrega una señal de voltaje (mV) correspondiente al pH de la solución que se mide.
- **ACOPLADOR DE IMPEDANCIAS:** Constituido por un *circuito seguidor* para acoplar impedancias entre el sensor y el resto del circuito.

- **AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION:** Acondiciona el voltaje (mV) desde acoplador de impedancias, para tener una salida entre 0V y 5V que se pueda manipular en el microcontrolador. El Circuito Integrado que se utiliza es el amplificador de instrumentación AD620.
- **CALIBRACION DEL OFFSET:** Fija el valor inferior del rango que se va a medir, en este caso el nivel bajo será a un pH = 0.
- **CALIBRACIÓN DE LA PENDIENTE:** Es la razón de voltaje de salida versus el voltaje de entrada en el amplificador de instrumentación. La calibración de la pendiente cumple la función de amplificar la señal de voltaje (mV) proveniente del electrodo de pH para tener un voltaje de salida entre 0V y 5V en el microcontrolador.

2.1.2.1 Electrodo de pH

Como se explicó en el Capítulo 1, un electrodo del pH consiste en dos medias células: un electrodo de medición y un electrodo de referencia. En la mayoría de los usos se utilizan hoy un electrodo que es la combinación de ambas medias células en un cuerpo de vidrio.

Sobre el 90% de la medida del pH los problemas se relacionan con el uso, el almacenaje, o la selección incorrecta de los electrodos. Un sensor de pH convencional es básicamente una batería de alta impedancia. La alta impedancia es el resultado de una de las placas de la batería "recubierta de vidrio."

El electrodo de epoxy es relativamente inmune a las interferencias del color, turbidez, material coloidal, cloro libre, oxidantes y reductores. La medición se afecta cuando la superficie de la membrana de epoxy está sucia con grasa o material orgánico insoluble en agua, que le impide hacer contacto con la muestra, por lo anterior se recomienda la limpieza escrupulosa de los electrodos.

Los electrodos de cuerpo epoxy universales tienen una resistencia eléctrica de aproximadamente 100 MΩ a 25 grados Centígrados, lo que permite su uso hasta temperaturas de 0 grados Centígrados, donde la resistencia aumenta hasta aproximadamente 1000 MΩ.

El electrodo de pH que se ha utilizado posee las siguientes características:

- Electrodo tipo AMPHEL, de COLE-PARMER.
- Opera en un rango de temperatura de 0 a 100 grados Centígrados
- Impedancia de salida del electrodo elevada.
- Rango de medida de 0 a 14 pH (linealidad de respuesta).
- Presión de trabajo 5 BAR
- Cuerpo Epoxy

En los Anexos se encuentran distintos tipos y características de electrodos de pH.

La Ecuación 2.3 mediante la cual la FEM de un electrodo adecuado de medida del PH se relaciona con la concentración del ion hidrógeno fue desarrollada por Nernst:

$$E = E\text{S} - (RT/nF) \log [H^+] \quad (1) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

R: es la constante de los gases.

T: la temperatura absoluta.

F : (el faraday) es igual a 96485 coulombs por mol (C/m).

n : es el número de electrones involucrados en el equilibrio.

E_S: es un potencial que depende del sistema de electrodo utilizado.

Para n = 1, se tiene el siguiente factor:

$$\frac{RT}{nF} = 0.0591 \text{ (a } 25^{\circ}\text{C)}$$

Usando la expresión de Sorenson, se tiene la Ecuación 2.4:

$$E = E^{\circ} + 0.0591 \text{ pH} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

La Ecuación 2.4 establece la relación de 59.1 mV por unidad de pH (a 25 °C) para cualquier sistema de electrodo que sigue la ecuación de Nernst. Donde, la variación del voltaje es de 59.1mV / pH. A un pH neutro el voltaje de la celda es de 0V.

La Figura 2.5 muestra la típica respuesta de un electrodo de pH.

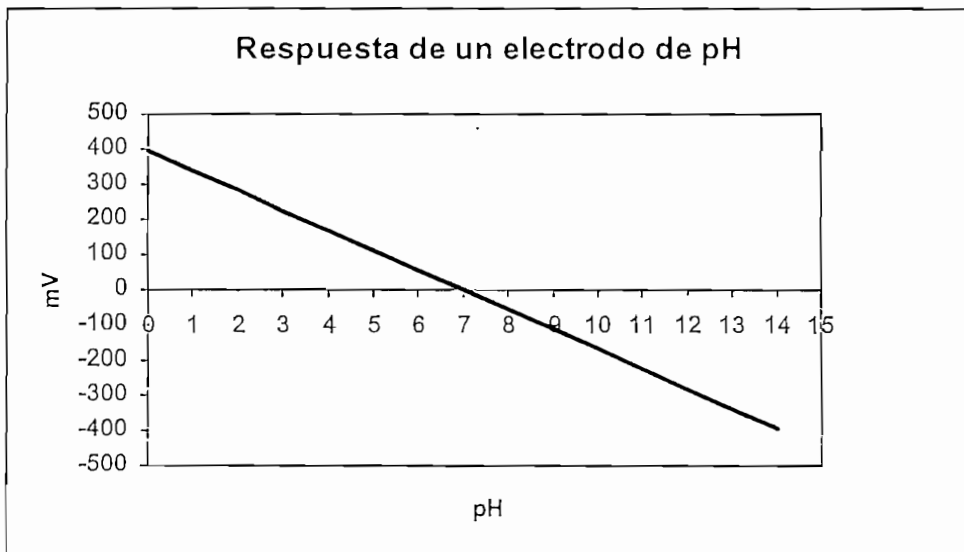


Figura 2.5 Resposta de un electrodo de pH

Antes de usar su electrodo para la primera vez, siga estos tres pasos para condicionar su electrodo:

1. Quite el cargador de la tapa protectora o del caucho del fondo del sensor y aclare el electrodo con agua destilada o desionizada.
2. Coloque el electrodo en un cubilete que contiene uno de los líquidos enumerados abajo (en orden de la capacidad iónica de condicionar el electrodo). Empape por 20 minutos.
 - o 3,8 KCL de M o de 4,0 M
 - o almacenador intermediario de 4,0 pH
 - o almacenador intermediario de 7,0 pH
3. Después de condicionar el sensor por 20 minutos, aclare el electrodo con agua destilada o desionizada. El electrodo es listo ahora para la calibración y medir el pH.

Se debe seguir las siguientes recomendaciones para conservar las características de un electrodo por mayor tiempo

- No almacene el electrodo en agua destilada o desionizada -- esto hará su electrodo inútil.
- Después del almacenaje, usted puede notar los cristales blancos del kCl formarse fuera de su electrodo. Esto no interferirá con las medidas. Aclare simplemente el electrodo.
- Nunca limpie un electrodo. El limpiar puede causar lecturas erróneas debido a las cargas estáticas. Borre el extremo del electrodo con papel sin pelusa para quitar exceso de agua. Siempre mantenga un electrodo de pH húmedo.

2.1.2.2 Acoplador de Impedancias

El circuito de la Figura 2.6 muestra un circuito con dos amplificadores operacionales en configuración seguidor de voltaje (de alta impedancia de entrada) cada uno, para acoplar impedancias entre el sensor de pH y el resto del circuito. El voltaje V1+ es de 11,4V.

Para el voltaje de referencia (Vref) del sensor se ha utilizado un divisor de voltaje constituido por las resistencias R1 y R2.

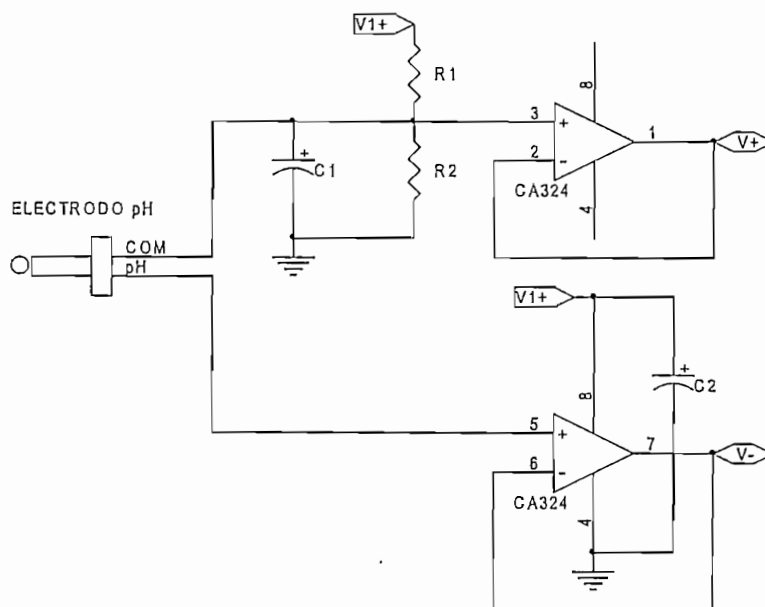


Figura 2.6 Circuito acoplador de impedancias

Si:

$$V_{\text{ref}} = \frac{11.4V}{2}$$

$$V_{\text{ref}} = 5.7V$$

$$V_{\text{ref}} = 5.7V = \frac{R1}{R1 + R2} * 11.4V$$

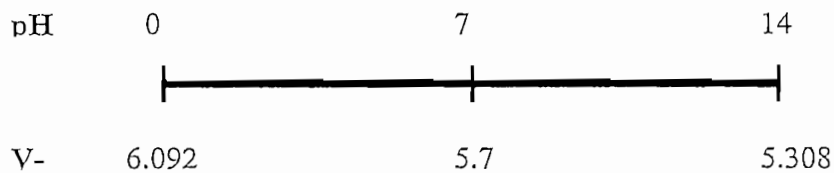
Sea:

$$R1 = 10K\Omega$$

Entonces:

$$R2 = 10K\Omega$$

Con el voltaje de referencia de 5.7V (entrada no inversora del amplificador de instrumentación), teniendo la relación de 56.1mV / pH, se tiene que para un pH= 7 el voltaje del sensor es 0V (pH = 0), el rango del voltaje V- (entrada inversora del amplificador de instrumentación) estará dentro del siguiente intervalo:



2.1.2.3 Circuito Amplificador de Instrumentación

En la Figura 2.7 se muestra el circuito amplificador de instrumentación con la corrección offset y la pendiente.

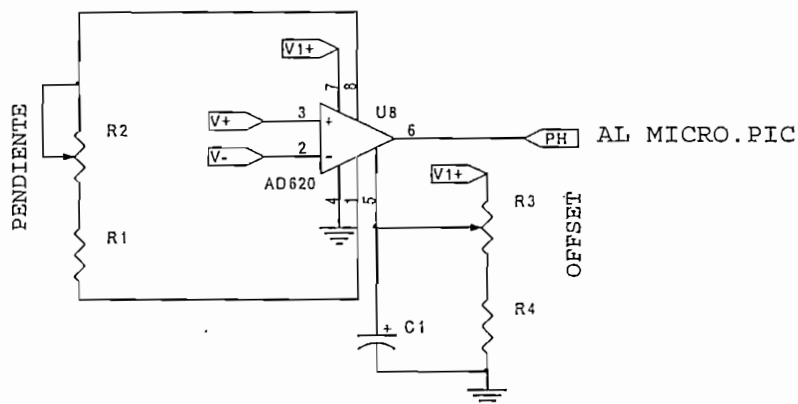


Figura 2.7 Circuito amplificador de instrumentación, offset y pendiente.

Como se explicó anteriormente, para el acondicionador de pH, se utilizará el C.I. AD620. El voltaje diferencial en la entrada del amplificador ($V_+ - V_-$), está dentro del siguiente rango para toda la escala de pH (Figura 2.8).

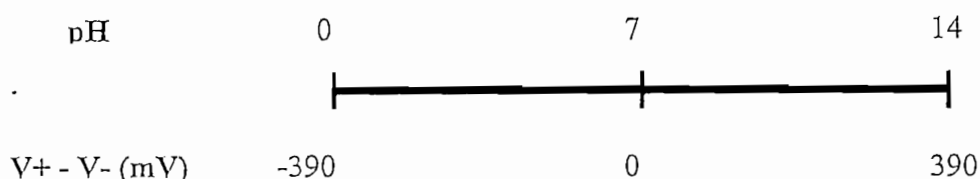


Figura 2.8. Rango de voltaje diferencial

De la Figura 2.8:

$$V_r = |V_{\text{pH}=14}| + |V_{\text{pH}=0}|$$

$$V_r = 390\text{mV} + 390\text{mV} = 780\text{ mV}$$

Donde:

V_r = Voltaje absoluto de todo el rango

El transmisor de pH tiene un rango máximo de calibración para cada una de las dos sustancias buffer que se utilizan. Esto debido a la posibilidad de que se usen sensores de pH o sustancias buffer con características demasiado pobres, que causen errores en las medidas. Si estas sustancias generan voltajes que se salen del rango de calibración, el transmisor no permite la calibración. La calibración se explica en el Capítulo 3.

Para tener un rango de voltaje para la calibración del transmisor de pH, se ha escogido el siguiente valor que debería obtenerse a la salida del acondicionador de pH.

$$V_{\text{máx}} = 4.5\text{ V} \quad \text{para pH} = 14$$

Con este voltaje, cuando el transmisor requiera una calibración, se tiene un rango de $\pm 0.5V$ sobre este valor.

Con V_r y $V_{m\acute{a}x}$, se puede obtener la ganancia que debería tener el amplificador de instrumentación:

$$G = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_r}$$

$$G = \frac{4.5 V}{0.78 V}$$

$$G = 5.7$$

Donde:

G = ganancia del amplificador de instrumentación

Con la fórmula de la ganancia del amplificador de instrumentación, se puede encontrar las resistencias R_1 y R_2 del circuito de la Figura 2.7

$$G = \frac{49.4 K\Omega}{R_G} + 1$$

$$R_G = \frac{49.4 K\Omega}{G - 1}$$

$$R_G = 10.5 K\Omega$$

$$R_G = R_1 + R_2$$

Sea:

$$R1 = 10 \text{ K}\Omega$$

Entonces:

$$R2 = 0.5 \text{ K}\Omega$$

A continuación se va a proceder a corregir el voltaje offset, procurando que para un pH = 0, el voltaje hacia el microcontrolador PIC sea 0V.

De la Figura 2.8 se deduce que el voltaje a pH = 0 es:

$$V (\text{pH} = 0) = -390\text{mV} * 5.7$$

$$V (\text{pH} = 0) = -2.2\text{V}$$

Este es el voltaje que debió ser compensado. Con este objetivo en el circuito de la Figura 2.7 se tiene el diseño de la corrección offset.

$$V_{\text{ref}} = 2.2\text{V} = \frac{R4}{R3 + R4} * 11.4\text{V}$$

Sea:

$$R4 = 1.2 \text{ K}\Omega$$

Entonces:

$$R3 = 5 \text{ K}\Omega$$

Finalmente, la señal de salida del acondicionador de pH es enviada hacia el microcontrolador PIC, a través de un amplificador en configuración seguidor de voltaje.

2.1.3 DISEÑO DEL ACONDICIONADOR DE EC

Para el diseño del circuito acondicionador de EC se van a tomar en cuenta las mismas consideraciones para la calibración de los rangos de voltaje que salen hacia el microcontrolador. El transmisor de EC va a tener un rango de medición de 0 ms/ cm a 10 ms / cm. El circuito acondicionador deberá entregar un rango de voltaje comprendido entre 0V y 5V para toda la escala de EC.

En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques general de las partes principales del circuito acondicionador de EC.

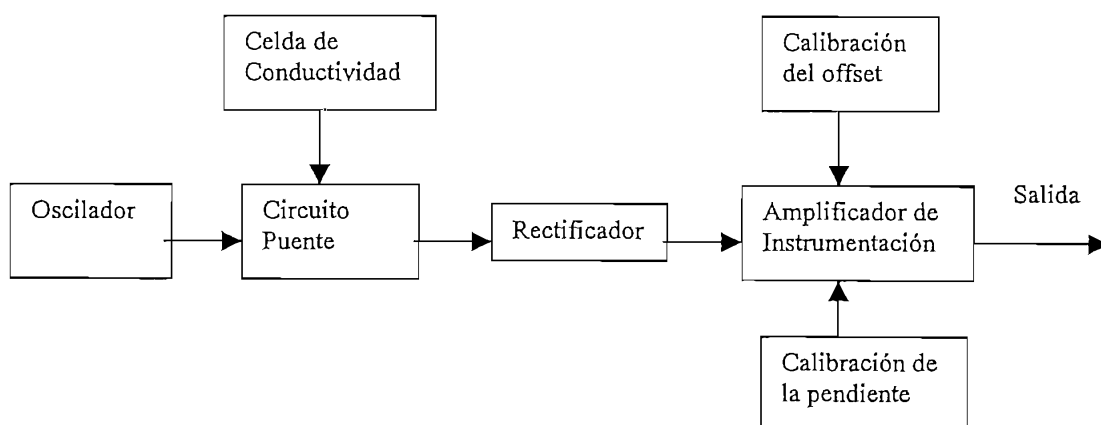


Figura 2.9. Diagrama de bloques del Circuito Acondicionador de EC

- **OSCILADOR:** Tensión de excitación de onda cuadrada necesaria que se debe aplicar al sensor de conductividad
- **CIRCUITO PUENTE:** Circuito para convertir la resistencia del electrodo de EC en una señal eléctrica.
- **CELDA DE CONDUCTIVIDAD:** Sensor constituido por dos electrodos. Varía su resistencia eléctrica en función de la conductividad del líquido.

- **RECTIFICADOR:** Convierte la corriente alterna en corriente continua
- **AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION:** Acondiciona el voltaje (mV) desde el rectificador, para tener una salida (0V – 5V) que se pueda manipular en el microcontrolador. El Circuito Integrado que se utiliza es el amplificador de instrumentación AD620.
- **CALIBRACION DEL OFFSET:** En esta etapa y con ayuda del Nivel de referencia, se tiene como objetivo fijar el valor inferior del rango que se va a medir, en este caso el nivel bajo será a una conductividad de 0 ms.
- **CALIBRACIÓN DE LA PENDIENTE:** Es la razón de voltaje de salida versus el voltaje de entrada en el amplificador de instrumentación. La calibración de la pendiente cumple la función de amplificar la señal de voltaje (mV) proveniente del rectificador para tener un voltaje de salida entre 0V y 5V en el microcontrolador.

La medición de la conductividad depende en gran medida de la temperatura. La dependencia de la temperatura se expresa normalmente como el cambio relativo por grado centígrado, normalmente conocido como cambio de porcentaje/°C respecto a 25°C o pendiente de la solución. Las pendientes pueden variar de forma muy significativa dependiendo del tipo de solución del proceso. El factor de compensación de temperatura adecuada para la mayoría de las aplicaciones es 2,00%/°C.

La Figura 2.10 muestra un circuito de medida de conductividad. La excitación cuadrada se aplica al circuito puente, en el que un potenciómetro permite un ajuste manual y en el que están conectados los electrodos así como elementos de compensación térmica. Se amplifica y rectifica la señal generada por la circulación de corriente a través de los electrodos. La constante de tiempo del condensador C1 y las resistencias asociadas es tal que se carga al valor de pico descrito a través el amplificador A2; esto evita que la salida esté promediada

con valores inferiores de corriente debidos a la electrólisis en los electrodos. La tensión de salida se muestra en un visualizador.

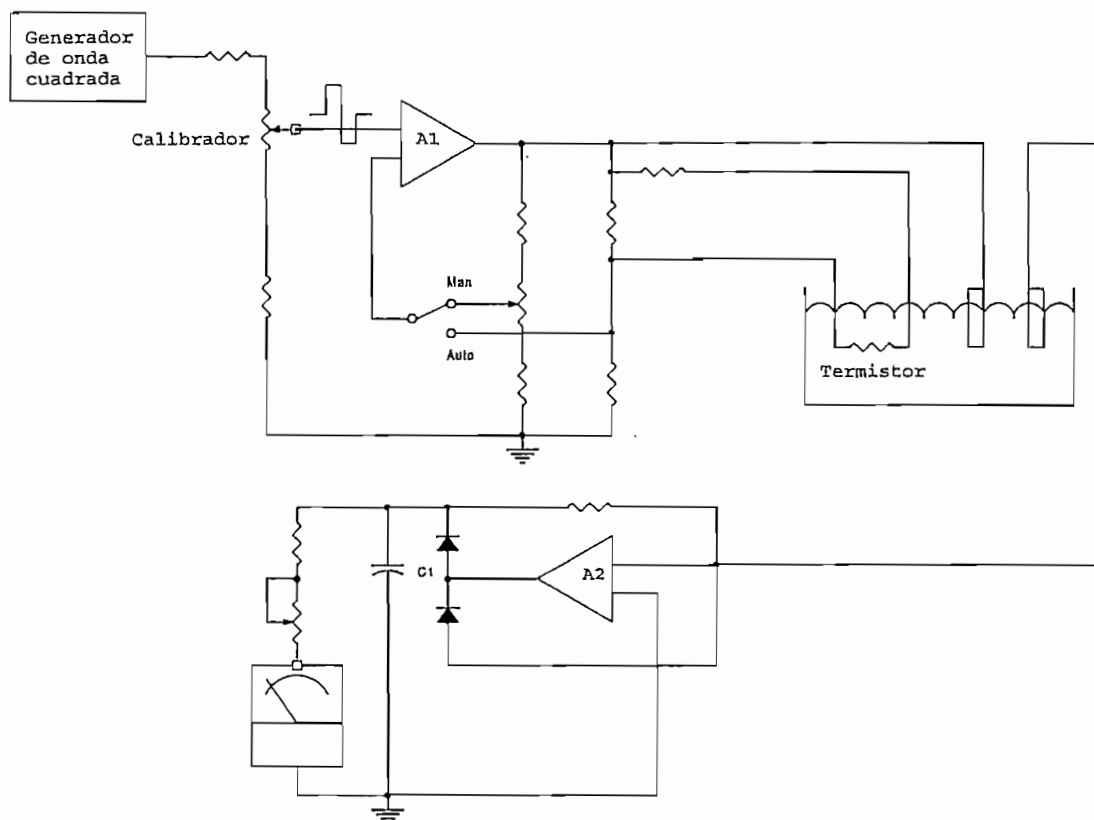


Figura 2.10 Circuito de medida de conductividad

2.1.3.1 Celda de Electroconductividad

La celda de dos electrodos es la más comúnmente utilizada para la medición de conductividad. Existen tipos de sensores de inserción, flujo y sumersión, que trabajan en sistemas automatizados en continuo para controlar flujos de agua tratada en desmineralizadores, aguas de calderas, circuitos de refrigeración, contaminaciones en ríos y lagos, ósmosis inversa y operaciones similares. Una de ellas son las máquinas de fertirrigación que trabajan a EC final o por incrementos de EC, que han proliferado enormemente en todas las zonas

hortícolas de España y que se han hecho imprescindibles en cualquier explotación agraria que pretenda una fertirrigación razonable y eficaz de sus cultivos.

La sonda que se va a utilizar es de PVC, y puede operar a una temperatura de 0°C a + 50°C, es de 4 anillos con sensor de temperatura incorporado. El material del que está compuesta la sonda es PVC. La constante de celda es $K_s = 1 \text{ cm}^{-1}$. En los Anexos se encuentran las características de otros tipos de celdas.

Después de escoger la celda de la constante adecuada, se debe seguir los siguientes pasos para obtener resultados exactos y repetitivos:

1. La celda deberá estar limpia antes de hacer cualquier medición.
2. La celda debe de estar suspendida en la solución de tal manera, que los orificios de venteo estén sumergidos. La cámara del electrodo no debe tener aire entrampado (esto se logra inclinando ligeramente la celda y golpeando suavemente los lados).
3. La celda deberá estar separada de las paredes y el fondo del recipiente, por lo menos 0.5 cm.
4. Si es posible, el recipiente o el sistema en donde se va a hacer la medición deberá estar aislado del potencial de la tierra.
5. La presencia de campos eléctricos y corrientes parásitas causadas por agitadores magnéticos, calentadores, etc., pueden causar dificultad para obtener lecturas adecuadas. El usuario deberá evaluar estos efectos y hacer las correcciones necesarias, utilizando cableado blindado o desconectándolos por un momento al hacer la lectura.
6. Manejar la celda con cuidado, para evitar que se rompa o que pierda su calibración.

7. La celda no se deberá transferir de una solución a otra, no sin antes lavarla cuidadosamente.
8. No guarde la celda sucia o contaminada.

2.1.3.2 Tensión de excitación del sensor de conductividad

El tipo de tensión aplicada a los sensores de conductividad es determinante en su rendimiento y comportamiento. Si se aplicara tensión perfectamente continua, el gráfico resultante de corriente versus el tiempo mostraría primero un pequeño transitorio debido a la capacidad del sensor y sus hilos de conexión, y seguidamente, un corto período donde la corriente es estrictamente función de la conductancia; a continuación, seguiría un largo período durante el cual la electrólisis en la superficie de la sonda haría disminuir la corriente hasta alcanzar un valor mínimo cuando se polarizara el sensor. Por esta razón, se utiliza excitación alterna al sensor. Cuando la forma de onda es senoidal, se obtiene una media de los cuatro estados descritos anteriormente. La única corriente de interés corresponde al corto intervalo que sigue al transitorio inicial. Esto apunta a la necesidad de utilizar una tensión de excitación en forma de onda cuadrada; debe tener un tiempo de subida lento de manera que quede minimizado el transitorio producido por la capacidad; debe ser de una frecuencia lo bastante elevada como para que se invierta la polaridad antes de que la electrólisis sea significativa. El error negativo todavía presente, producido al promediar, puede minimizarse empleando un circuito detector de picos. El efecto de la resistencia de los hilos puede minimizarse utilizando una conexión de cuatro hilos al circuito en puente asociado, como se hace para termómetros de resistencia. Los efectos de resistencia de los hilos conductores, así como la polarización, se reducen aún más utilizando electrodos de tensión y corriente separados.

El circuito de la Figura 2.11 se denomina oscilador de relajación, definición de un circuito que genera una señal de salida cuya frecuencia depende del

proceso de carga de un capacitor. Si se incrementa la constante de tiempo RC , le toma más tiempo al voltaje del capacitor alcanzar los puntos de conmutación. Por lo tanto la frecuencia es más pequeña.

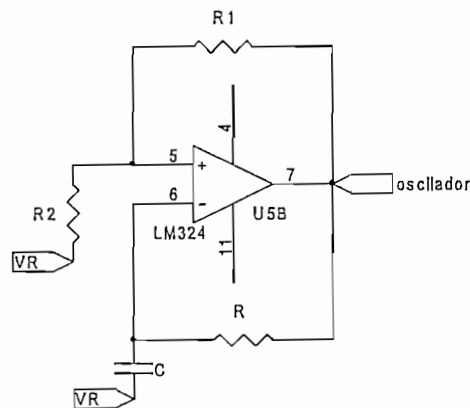


Figura 2.11 Oscilador de Relajación.

La tensión de entrada no inversora V_+ del amplificador operacional es el resultado de acoplar la tensión de salida a través de un divisor compuesto por R_1 y R_2 . El voltaje de referencia (V_R) para todo el acondicionador de EC es de 5.6V.

La tensión a la entrada inversora se desarrolla en el capacitor como parte de una combinación RC . Si se supone que la salida está en saturación positiva, el capacitor se cargará exponencialmente hacia $+V_{sat}$. Nunca alcanzará el valor de $+V_{sat}$ debido a que su voltaje encuentra el punto de conmutación superior, como se muestra en la Figura 2.12. Cuando esto sucede, el voltaje de la salida conmuta a $-V_{sat}$ y el capacitor invierte la dirección del proceso de carga. Entonces el voltaje del capacitor disminuye como se muestra. Cuando el voltaje del capacitor encuentra el punto de conmutación inferior, la salida conmuta y regresa a $+V_{sat}$. El ciclo se repite. Debido a la carga y descarga continua del capacitor la salida es una onda rectangular con un ciclo de trabajo del 50%.

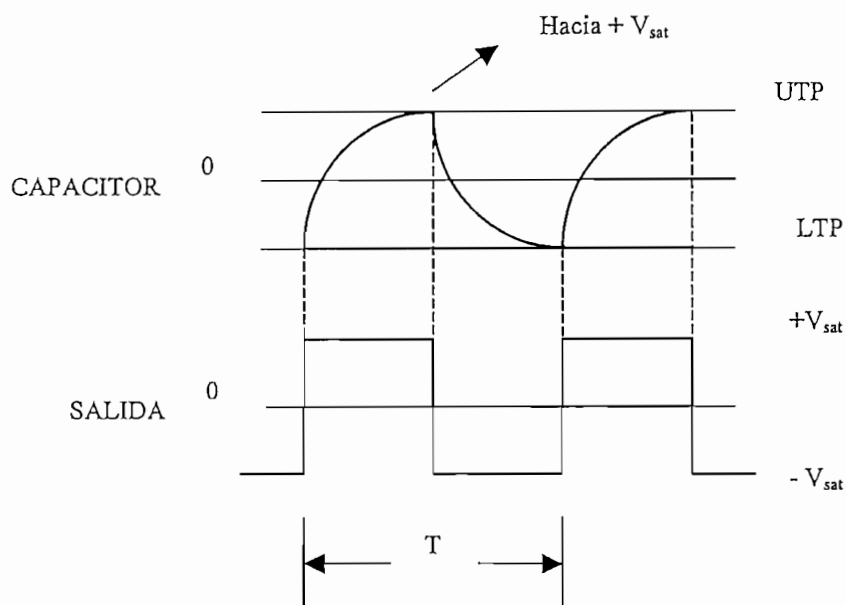


Figura 2.12 Formas de onda del oscilador de relajación.

La Ecuación 2.5 sirve para calcular el período de la salida rectangular:

$$T = 2 RC \ln \frac{1 + B}{1 - B} \quad \text{Ecuación 2.5}^{2.2}$$

Donde B es la fracción de retroalimentación y viene dado por:

$$B = \frac{R2}{R1 + R2} \quad \text{Ecuación 2.6}^{2.3}$$

^{2.2} MALVINO. PRINCIPIOS DE ELECTRONICA. PAG. 820

^{2.3} MALVINO. PRINCIPIOS DE ELECTRONICA. PAG. 820

De aquí se obtienen los puntos de conmutación superior e inferior (UTP y LTP) del capacitor.

$$UTP = B V_{sat}$$

2.4

$$LTP = - B V_{sat}$$

La frecuencia de la onda cuadrada será de 3.3 KHz, entonces:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = 303 \mu s$$

Sea:

$$R1 = 47K\Omega$$

$$R2 = 15K\Omega$$

De la Ecuación 2.6 se tiene que la fracción de retroalimentación es:

$$B = \frac{15K\Omega}{47 K\Omega + 15 K\Omega}$$

$$B = 0.242$$

Sustituyendo T y B en la Ecuación 2.5 se obtiene:

$$RC = T / \left[2 \ln \frac{1 + B}{1 - B} \right]$$

$$RC = 306 \mu s$$

Sea:

$$C = 20 \text{ nF}$$

Entonces:

$$R = 15 \text{ K}\Omega$$

2.1.3.3 Circuito tipo puente y rectificador para el acondicionador de EC

El circuito tipo puente que se plantea se puede observar en la Figura 2.13.

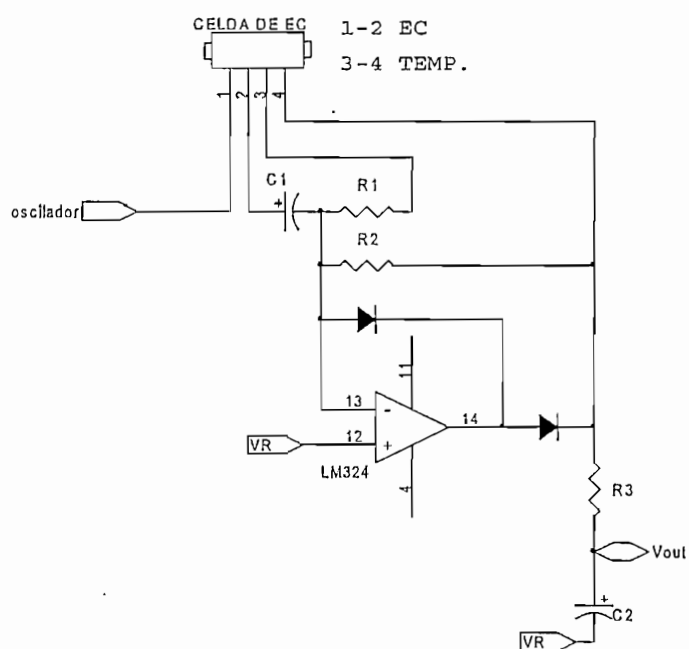


Figura 2.13 Circuito tipo puente y rectificador

El sensor de conductividad eléctrica posee 4 terminales: los dos primeros corresponden a la celda de electroconductividad propiamente, y los dos siguientes pertenecen al sensor de temperatura incorporado en la celda.

El voltaje de referencia (VR) para el circuito acondicionador es de 5.6V. La señal del circuito oscilador diseñado, alimenta a la celda de conductividad. La señal de la celda de conductividad es rectificadora a través del circuito conformado por el amplificador operacional y los dos diodos, tal como indica la Figura 2.13.

El sensor de temperatura que incorpora la celda de electroconductividad es del tipo Termistor de 10 K Ω .

Las mediciones de electroconductividad deben ser respecto a una temperatura de 25°C. Como se mencionó anteriormente, el transmisor posee compensación de temperatura. La compensación de temperatura se la hace en esta parte del circuito. El voltaje del rectificador es compensado en un 2% por cada grado centígrado que disminuye la temperatura. Si la temperatura aumenta en 1°C con respecto a 25°C, el voltaje es disminuido en un 2%. Las resistencias R1 y R2 para el circuito del Termistor son:

$$R1 = 2,7 \text{ K}\Omega$$

$$R2 = 22 \text{ K}\Omega$$

Con esto, el voltaje diferencial en la entrada del amplificador ($V_{dif} = V_{in+} - VR$), para distintos valores de conductividad eléctrica se muestra en la Tabla 2.1. Los valores de Conductividad de las muestras se los ha obtenido con la ayuda de sustancias buffer y un instrumento patrón.

EC (ms/cm)	Vdif (mV)
0.1	30.3
0.4	46.8
1.0	91.7
2.0	156.6
3.0	225.1
4.0	293.5
5.0	362.5
6.0	426
7.0	489
8.0	560
9.0	626
10.0	695

Tabla 2.1. Rango de voltaje diferencial

La Figura 2.14 muestra el gráfico de la relación de los valores de la Tabla 2.1.

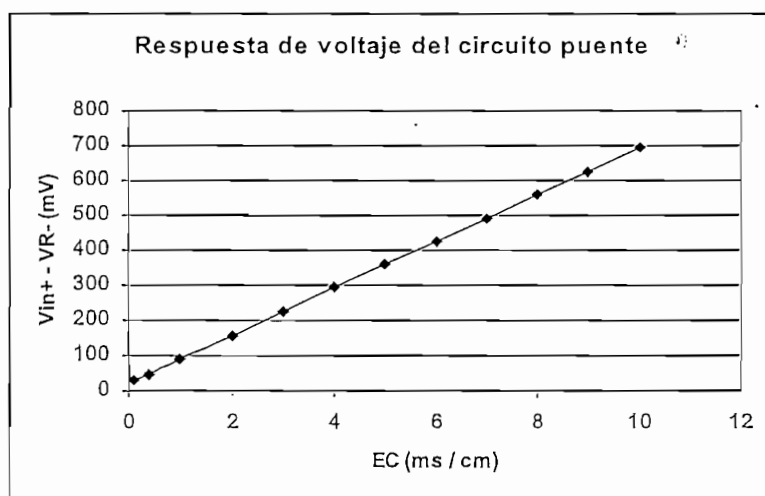


Figura 2.14 Resposta de voltaje del circuito puente del acondicionador de EC

Como se observa en esta figura, la respuesta del circuito puente es lineal.

2.1.3.4 Circuito Amplificador de Instrumentación

Esta parte del circuito acondicionador de EC, tiene las mismas características eléctricas que el acondicionador de pH. En la Figura 2.15 se muestra el circuito amplificador de instrumentación con la corrección offset y la pendiente.

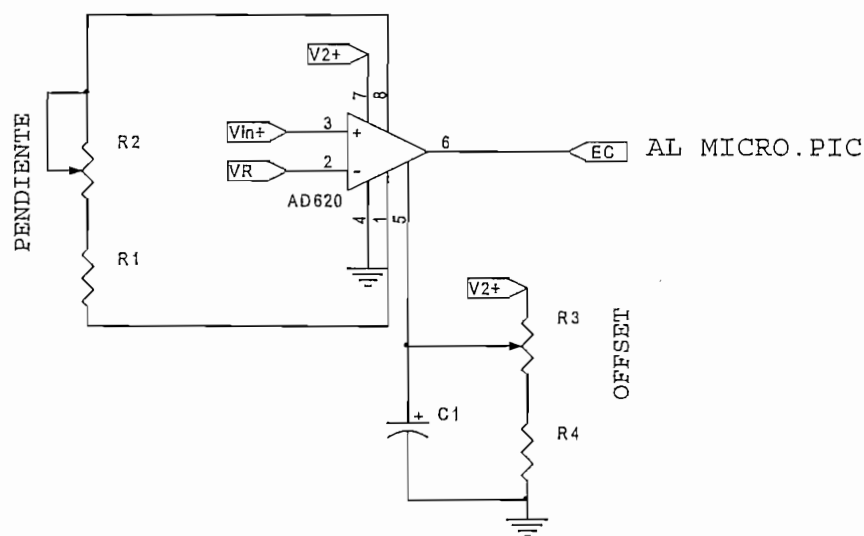


Figura 2.15 Circuito amplificador de instrumentación, offset y pendiente para EC

De la Figura 2.15:

V_{in+} : Voltaje que proviene del circuito puente.

V_R : Voltaje de referencia que es de 5.6 V.

Para la calibración del transmisor de EC se siguen las mismas condiciones que para el transmisor de pH. Para tener un rango de voltaje para la calibración del transmisor de EC se ha escogido los siguientes valores que debería obtenerse a la salida del acondicionador de EC.

$$V_{\text{máx}} = 4.5 \text{ V para EC} = 10\text{ms/cm}$$

$$V_{\text{mín}} = 1.2 \text{ V para EC} = 0.0\text{ms/cm}$$

El microcontrolador es el encargado de transmitir y visualizar los valores de EC, en función de los valores de voltaje máximo y mínimo del acondicionador de EC.

Con $V_{\text{máx}}$ y $V_{\text{mín}}$ se tienen las siguientes ecuaciones para obtener la ganancia y el voltaje offset del amplificador de instrumentación:

$$V_{\text{máx}} = G \cdot V_{\text{dif}10\text{ms/cm}} + V_{\text{offset}}$$

$$V_{\text{mín}} = G \cdot V_{\text{dif}0\text{ms/cm}} + V_{\text{offset}}$$

Sustituyendo los valores ($V_{\text{máx}}$, $V_{\text{mín}}$, $V_{\text{dif}10\text{ms/cm}}$, $V_{\text{dif}0\text{ms/cm}}$) en las ecuaciones anteriores se tiene:

$$4.5\text{V} = G \cdot 0.695\text{V} + V_{\text{offset}}$$

$$1.2 = G \cdot 0.02\text{V} + V_{\text{offset}}$$

Donde:

G = ganancia del amplificador de instrumentación

Resolviendo las ecuaciones anteriores se tiene:

$$V_{\text{offset}} = 1.1 \text{ V}$$

$$G = 4.8$$

Con la fórmula de la ganancia del amplificador de instrumentación (Ecuación 2.1), se puede encontrar las resistencias R1 y R2 del circuito de la Figura 2.15

$$G = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{R_G} + 1$$

$$R_G = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{G - 1}$$

$$R_G = 13 \text{ K}\Omega$$

$$R_G = R1 + R2$$

Sea:

$$R1 = 10 \text{ K}\Omega$$

Entonces:

$$R2 = 3 \text{ K}\Omega$$

El voltaje offset que se debe compensar es el siguiente:

$$V_{\text{offset}} = 1.1\text{V}.$$

Entonces resulta:

$$V_{\text{offset}} = 1.1\text{V} = \frac{R4}{R3 + R4} * 11.2\text{V}$$

Sea:

$$R4 = 1 \text{ K}\Omega$$

Entonces:

$$R3 = 9.1 \text{ K}\Omega$$

Finalmente la señal de salida del acondicionador de EC es enviada hacia el microcontrolador PIC, a través de un amplificador en configuración seguidor de voltaje.

2.2 DISEÑO DEL CENTRO DE PROCESAMIENTO DE DATOS

En la Figura 2.16 se presenta un diagrama de bloques de los que constituye el centro de procesamiento de datos.

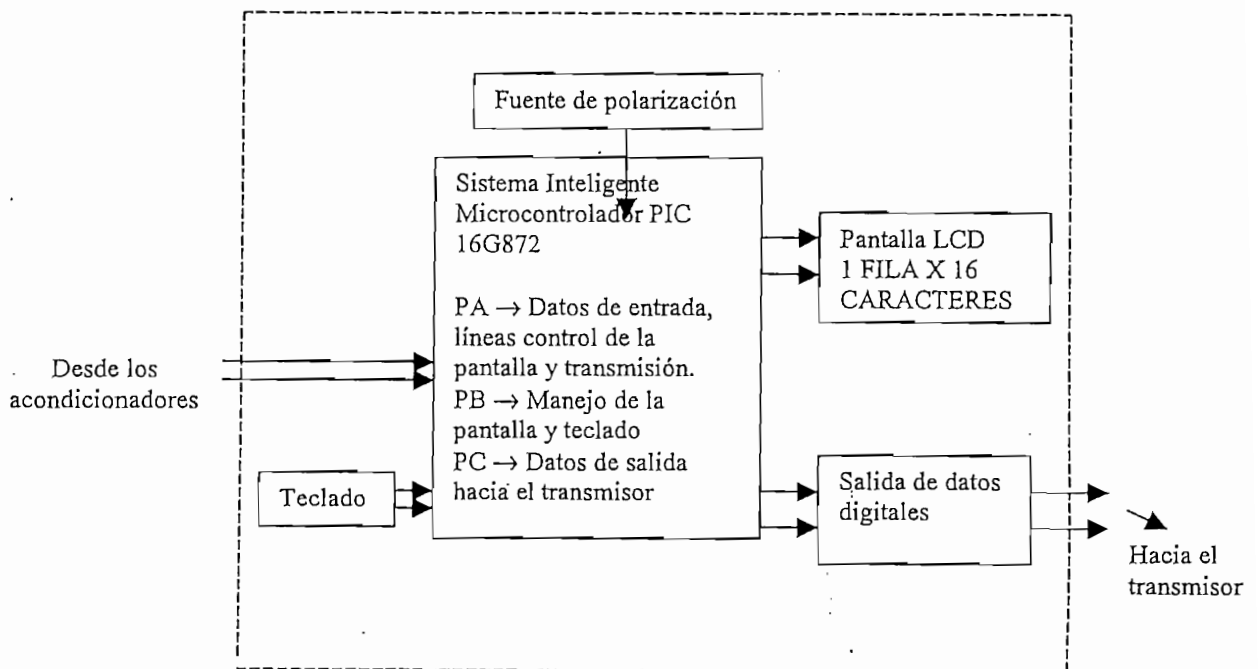


Figura 2.16. Diagrama de Bloques del Centro de Procesamiento de datos

El centro de procesamiento de datos encierra toda la circuitería necesaria para la recepción de información de los acondicionadores de EC y pH, visualización de los datos en el módulo LCD, manejo del teclado, envío de datos digitales hacia la etapa de transmisión, y operaciones matemáticas complementarias para el funcionamiento adecuado del centro de procesamiento de datos. Todas estas opciones serán manejadas por un elemento inteligente, el microcontrolador "PIC 16F872", el mismo que posee las características necesarias para realizar este trabajo.

2.2.1 SISTEMA INTELIGENTE

El sistema inteligente tiene como elemento principal al microcontrolador, el cual lee la información analógica de los acondicionadores de Electroconductividad y pH, muestra los datos y los envía en forma digital hacia el transmisor. Para realizar estas tareas, se debe desarrollar un programa, que se grabará en la memoria EEPROM del microcontrolador PIC 16F872. En la Figura 2.17 se muestra el circuito del sistema inteligente.

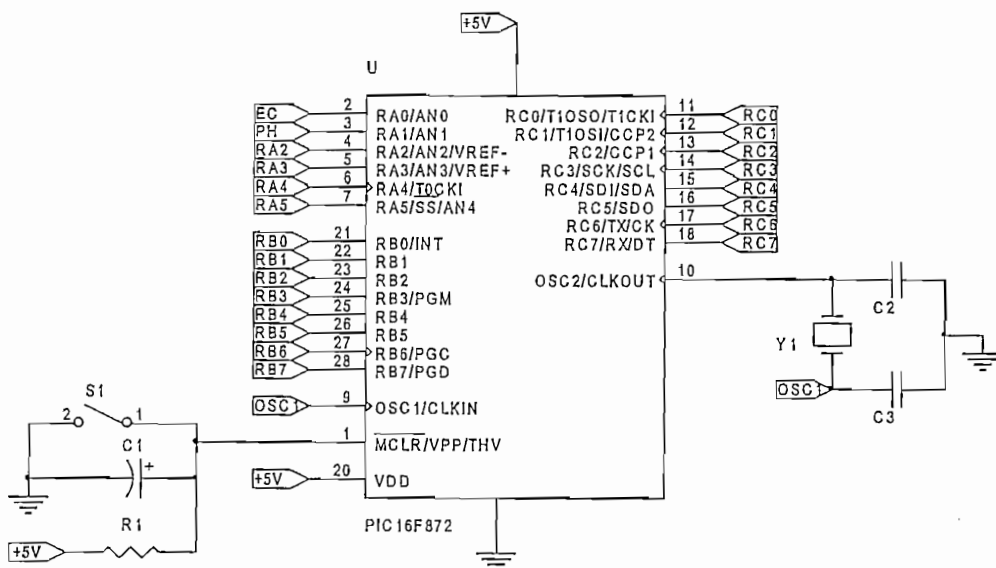


Figura 2.17. Circuito del sistema inteligente

La Tabla 2.2 muestra la función de cada uno de los pines de los puertos del microcontrolador PIC.

PIN	FUNCION
RA0	Entrada de valores analógicos desde el acondicionador de EC
RA1	Entrada de valores analógicos desde el acondicionador de pH
RA2	Pin de habilitación de escritura o control del módulo LCD
RA3	Habilitación del LATCH para la salida de datos de EC hacia el transmisor
RA4	Habilitación del LATCH para la salida de datos de pH hacia el transmisor
RA5	Pin de habilitación del módulo LCD
RB0..RB7	8 bits para salida de datos hacia el módulo LCD.
RB0	Línea de control del teclado
RB4, RB5, RB6, RB7	Pines de conexión de las 4 teclas: ESC, MENU, SELECT, y ENTER
RC0 a RC7	8 bits de salida de datos de EC y pH hacia los conversores digital / análogo

Tabla 2.2 Distribución de pines del microcontrolador PIC.

2.2.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DEL TECLADO

Uno de los objetivos principales de este proyecto, es la posibilidad de que el dispositivo tenga un programa que le permita autocalibrarse. Tanto para la electroconductividad como para el pH, la calibración se la realizará aplicando sustancias patrones respectivamente. Para facilitar esta tarea, el dispositivo cuenta con un módulo LCD y un teclado. El circuito del teclado se muestra en la Figura 2.18.

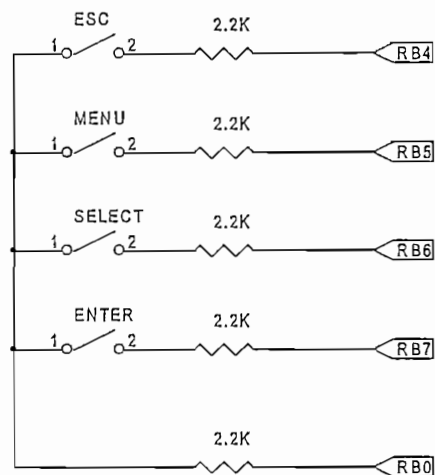


Figura 2.18 Circuito de teclado

Como se observa en la Figura 2.18 el teclado está conformado por 4 pulsadores (ESC, MENU, SELECT, ENTER), lo que están conectados a 4 pines del microcontrolador (RB4, RB5, RB6, RB7) y una línea de control (RB0). La lectura del teclado, se la realiza con la ayuda de un programa grabado en el microcontrolador, que se detalla en el Capítulo 3.

2.2.3 MANEJO DEL MODULO LCD

Los módulos de cristal líquido se pueden conectar fácilmente a microcontroladores, microprocesadores o computadoras, lo que permite que los proyectos tengan una óptima presentación y funcionalidad.

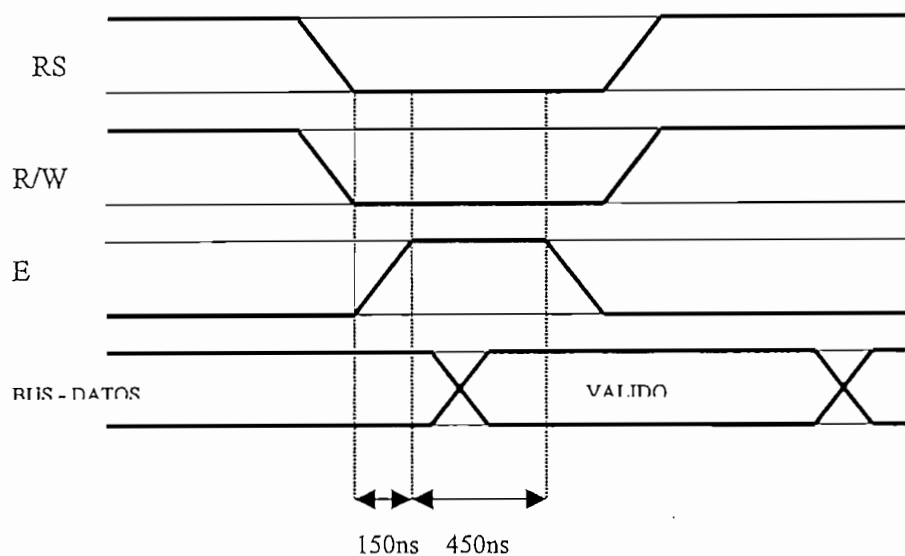
Este proyecto utiliza un módulo LCD 1x16 (1 línea x 16 caracteres), que es manejado por el microcontrolador PIC 16F872. Los pines de conexión de este módulo incluye un bus de datos de 8 bits, un pin de habilitación (E), un pin de selección, que indica que el dato es una instrucción o un carácter del mensaje (RS) y un pin que indica si se va a escribir o leer en el módulo LCD (RW). La Tabla 2.3 se muestra la función de cada uno de los pines del módulo LCD.

TERMINAL	SIMBOLO	NOMBRE Y FUNCION
1	Vss	Tierra, 0V
2	Vdd	Alimentación +5V
3	Vo	Ajuste de voltaje de contraste
4	RS	Selección Control/Dato
5	R / W	Lectura/escritura en LCD
6	E	Habilitación
7	D0	D0 Bit menos significativo
8	D1	D1
9	D2	D2
10	D3	D3
11	D4	D4
12	D5	D5
13	D6	D6
14	D7	D7 Bit más significativo

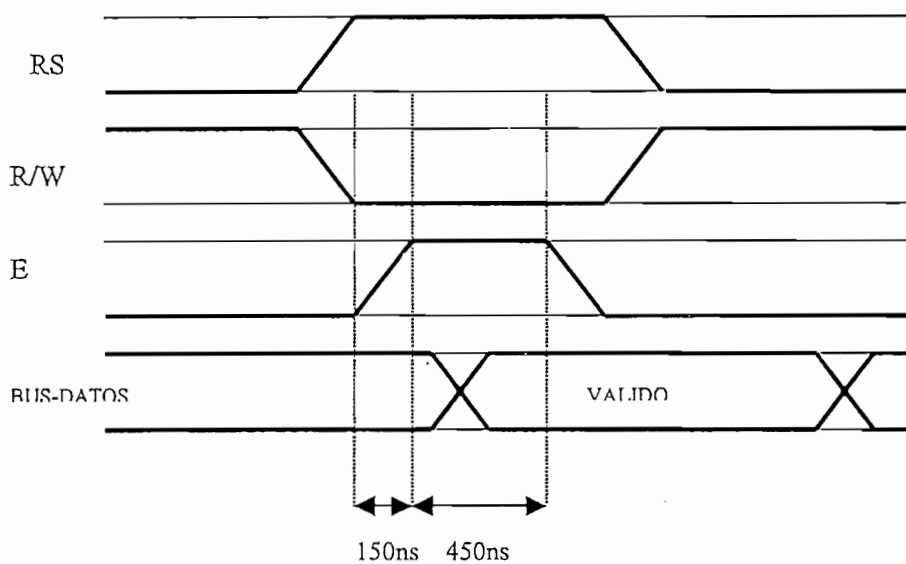
Tabla 2.3 Función de los pines del módulo LCD.

El módulo LCD responde a un conjunto especial de instrucciones, las cuales deben ser enviadas por el microcontrolador, según la operación que se requiera. Los caracteres que se envían al módulo LCD se almacenan en la memoria RAM del módulo. Existen posiciones de memoria RAM, cuyos datos son visibles en la pantalla y otras que no son visibles, estas últimas se pueden utilizar para guardar caracteres que luego se desplazan hacia la parte visible.

Según la operación que se desee realizar sobre el módulo de cristal líquido, los pines de control E, RS y RW deben tener un estado determinado. Además, debe tener en el bus de datos un código que indique un carácter para mostrar en la pantalla o una instrucción de control. En la Figura 2.19 se muestra el diagrama de tiempos que se debe cumplir para manejar el módulo.



a) Enviar una instrucción al módulo.



b) Escribir un caracter en la pantalla.

Figura 2.19. Diagrama de tiempo de las señales del módulo.

La interface entre el microcontrolador y el display de cristal líquido se la hará con el bus de datos trabajando a 8 bits.

2.2.4 SALIDA DE DATOS DIGITALES

En el circuito de la Figura 2.20 se muestra este circuito.

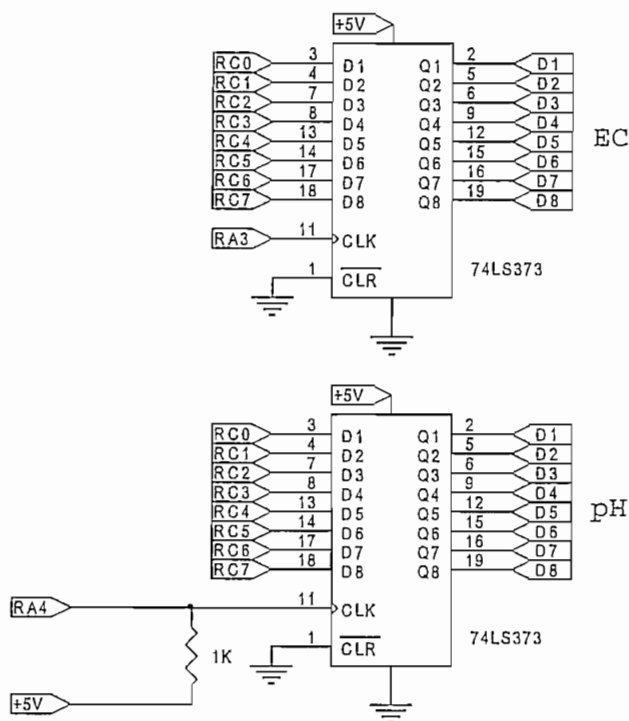


Figura 2.20 Salida de datos digitales

Los datos de EC y pH, son enviados del microcontrolador PIC hacia la etapa de transmisión utilizando los 8 bits del PUERTO C. Para enviar estos datos hacia su respectivo circuito de transmisión se utiliza 1 LATCH para cada magnitud. Para el control de cada LATCH, se utilizaron los pines RA3 (para EC), y RA4 (para pH), los mismos que son controlados a través del programa que se detalla en el Capítulo 3.

El Pin RA4 del microcontrolador es colector abierto (open drain), por lo que se debe colocar una resistencia de $1K\Omega$ entre este pin y VCC (+ 5V).

2.3 TRANSMISION DE DATOS

Con este nombre se quiere identificar a la etapa que se encarga de proveer la corriente DC con un rango de 4 a 20 mA, característica principal de los transmisores industriales.

2.3.1 EL TRANSMISOR DE 4 – 20 mA

Algunos sistemas se utilizan en la industria para comunicar la información análoga sobre pares de alambre; el más popular es el transmisor de 4 a 20mA.

Las razones principales de esto son:

- Inmunidad al ruido.
- Inmune a las caídas de voltaje debido a las conexiones pobres.
- Capaz de proveer energía al transductor alejado.
- Detección fácil de la falla de rotura del lazo.

Como el nombre implica, el valor análogo es representado por una corriente continua que va de 4mA para un nivel cero de la señal a 20mA para un nivel a gama completa de la señal. El límite más bajo, 4mA, asegura que la corriente del lazo esté siempre disponible aún para el caso de 0 valor de la variable medida.

Para la etapa transmisión se utilizó el circuito integrado AD694, que es un transmisor monolítico de corriente.

A continuación se describe su diagrama de etapas interno, características, y funcionamiento.

2.3.2 CIRCUITO INTEGRADO AD694

El circuito integrado AD694 es un transmisor de corriente monolítico que acepta entradas de señal de alto nivel, y entrega una corriente estándar de 4-20 mA.

La Figura 2.21 muestra el diagrama esquemático del circuito integrado AD694.

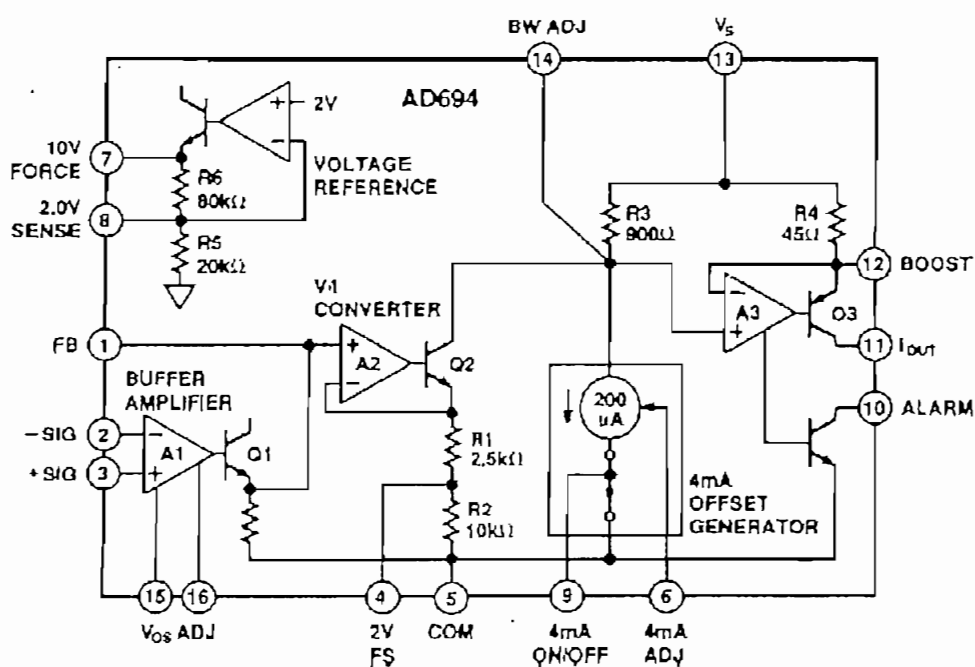


Figura 2.21. Diagrama funcional del C.I. AD694

La señal de entrada es protegida por un amplificador que se puede utilizar para escalar la señal de entrada o como amplificador de salida para la corriente de un convertidor digital/análogo. Los rangos de entrada del transmisor se los pueden seleccionar de 0V a 2 V y 0 V a 10 V. Otros intervalos se pueden programar con el resistor externo.

El AD694 tiene un circuito de alarma que advierte sobre un lazo abierto de corriente de salida, o un voltaje en I_{out} superior a $V_s - 2V$. Un transistor externo de paso se puede utilizar con el AD694 para sacar datos de la disipación de la energía del AD694, prolongando la gama de temperaturas de operación.

El circuito integrado AD694 es ideal para los sistemas que requieren la transmisión de 4-20 mA inmune a la señal de ruido para accionar las válvulas, los actuadores, y otros dispositivos para el control de procesos, también para la transmisión de parámetros de procesos tales como presión, temperatura, conductividad, flujo, o pH.

Se recomienda como reemplazo para los diseños discretos en una variedad de aplicaciones en control de procesos industriales, la automatización de fábricas, y sistemas de monitoreo.

El AD694 está disponible en un encapsulado plástico de 16 pines, especificado sobre $0^{\circ}C$ a una temperatura de $+70^{\circ}C$.

A continuación se resume las características del Transmisor Monolítico AD694

- Rangos de salida de 4-20 mA, o 0-20 mA.
- Rangos de entrada precalibrados de 0V a 2 V, o 0V a 10 V.
- Referencia de voltaje de precisión programable a 2,000 V o 10,000 V.
- Operación sola o dual de la fuente.
- Gama Ancha De la Fuente De Alimentación: +4,5 V a +36 V.
- Amplificador de protección de la entrada.
- Alarma de lazo abierto.
- Transistor externo opcional de paso para reducir los errores self-Heating (se extiende los rangos de temperatura de trabajo).

La función de cada uno de los pines se describe en la Tabla 2.4

# PIN	DESIGNACION	DESCRIPCION
1	FB	Entrada no invertida de convertor V/I
2	Sig -	Entrada invertida del transmisor
3	Sig +	Entrada no invertida del transmisor
4	2V Fs	2V a gama completa
5	COM	Campo común
6	4mA ADJUST	Ajuste de 4mA
7	10V Fuerza	Voltaje de referencia de 10V
8	2V Sense	Voltaje de referencia de 2V
9	4mA ON/OFF	Control 4Ma
10	ALARMA	Alarma para lazo de corriente
11	I out	Salida Actual
13	Vs	Fuente Positiva
14	Ajuste de BW	Ajuste de la anchura de banda
15	Vos	Ajuste compensado del voltaje
16	ADJ	Control de Ajuste compensado del voltaje

Tabla 2.4 Descripción de los pines del C.I. AD694

2.3.3 DESCRIPCION FUNCIONAL DEL C.I. AD694

La operación del C.I. AD694 puede ser mejor entendida dividiendo al circuito de la Figura 2.21 en tres partes funcionales. Primero un "Amplificador Buffer", el cual conduce a una segunda etapa: un convertor de voltaje a corriente, en el cual se obtiene la señal de 0mA a 16mA. En la tercera sección se tiene un circuito que genera un voltaje de referencia y un generador de offset, la cual es responsable de proveer los 4mA de offset de corriente.

2.3.3.1 Amplificador buffer

Es un amplificador que puede ser usado como uno de ganancia unitaria, un amplificador de salida para un conversor D / A, o como un bloque de ganancia para amplificar señales de bajos niveles. El rango de entrada de voltaje va desde cerca de 1mV hasta 2.5V de V_s ($V_s - 2.5V$), cuando el amplificador es operado como un seguidor emisor. La mínima impedancia de entrada es de $5M\Omega$.

2.3.3.2 Conversor Voltaje/Corriente

La señal de entrada a partir de la primera etapa (buffer amplifier), es convertida a una corriente de 0 a 0.8 mA por A2 (conversor voltaje / corriente). Esta corriente es amplificada por un factor de 20, haciendo que la señal de corriente sea de 0 a 16 mA. Esta técnica permite a la etapa de salida llevar a la carga hasta 2V menor al voltaje positivo de la fuente (V_s).

La función de transferencia de esta etapa es:

$$I_{out} = \frac{20 * V_{(PIN 1)}}{R1 + R2} \quad 2.5$$

Donde:

$$R1 + R2 = 12.5 K\Omega$$

Esto resulta en una corriente de salida de 0-16 mA para una entrada de 0-10V.

2.3.3.3 Generador offset de 4mA

Este circuito convierte un voltaje constante a partir del voltaje de referencia a una corriente constante de aproximadamente $200\mu\text{A}$. Esta corriente es sumada con la señal de corriente del Pin14 (BW Adjust), el resultado es una corriente constante de 4mA offset en el Pin 11 (Iout). El ajuste de 4mA (Pin 6), permite ajustar la corriente offset a cualquier valor comprendido entre 2mA a 4.8mA. El Pin 9 (4 mA ON/OFF), permite anular la corriente offset completamente, permitiendo la operación del AD694 de 0mA a 20 mA. En operación normal de 4-20mA, el Pin 9 es conectado a tierra.

2.3.3.4 Voltaje de referencia

Un voltaje de referencia de 2 V o 10 V está disponible para utilizar en distintas aplicaciones. El voltaje de 10 V está disponible cuando se usa una fuente mayor a 12.5 V, mientras que la opción de 2 V está disponible para fuentes entre 4.5 V y 36 V. La referencia puede suministrar valores arriba de 5 mA para distintas aplicaciones.

2.3.4 DISEÑO DEL CIRCUITO TRANSMISOR

Como se mencionó anteriormente, para la etapa de transmisión se utiliza el C.I. AD694. Tanto para la Electroconductividad como para el pH, se utilizará el mismo diseño para cada magnitud. En la Figura 2.22 se muestra un diagrama de bloques de esta etapa.

Al diagrama de la Figura 2.22 se lo puede dividir en dos etapas para su mejor comprensión. La primera etapa tiene como entrada datos digitales de 8 bits (EC o pH) que provienen del centro de procesamiento de datos y los acondiciona a valores de voltaje de 0 a 10V (rango de trabajo) necesarios para el C.I. AD694. La segunda etapa es la encargada de procesar los datos por medio del C.I.

AD694, para transmitir una corriente entre 4 y 20 mA. El AD694 tiene un circuito de alarma de lazo abierto y calibración del offset. La descripción y el diseño de los circuitos para cada una de las etapas se va a describir a continuación.

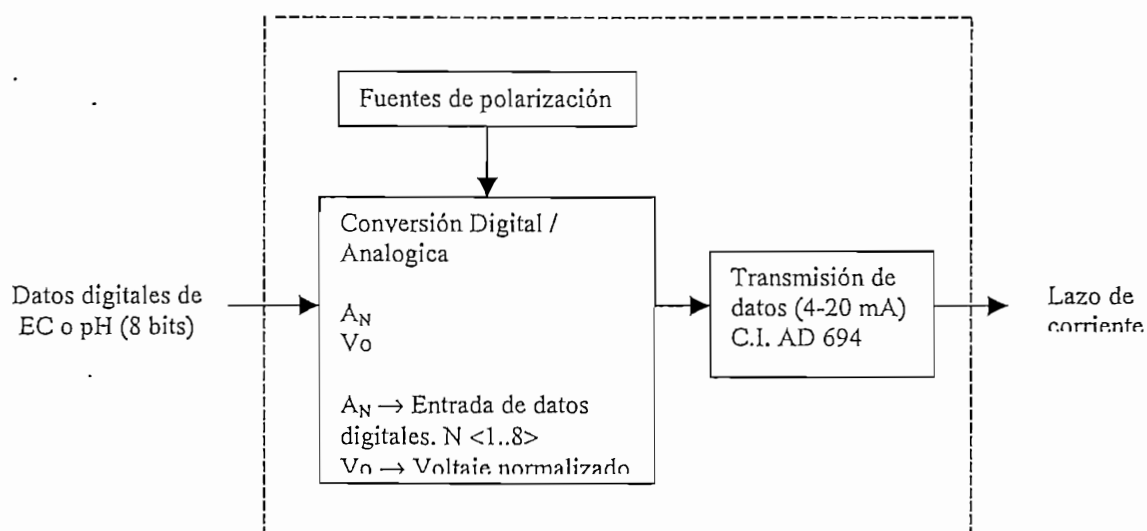


Figura 2.22 Diagrama de bloques de la etapa de transmisión.

2.3.4.1 Conversión Digital / Analógica

En la Figura 2.23 se muestra está etapa.

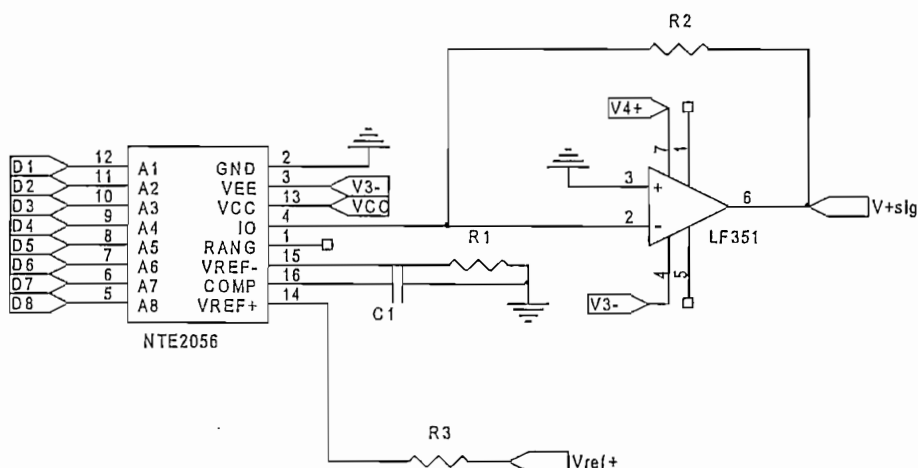


Figura 2.23. Circuito de conversión digital / analógico

La primera etapa está constituida por un conversor digital / análogo de 8 bits (NTE 2056), y un conversor de corriente / voltaje (LF 351).

La corriente de salida del conversor (resultado de la conversión de 8 bits) versus el dato de 8 bits que se tiene en la entrada está dado en la Ecuación 2.7:

$$I_o = - \frac{V_{REF+} * (A_1 / 2 + A_2 / 4 + .. A_8 / 256)}{R3} \quad \text{Ecuación 2.7}^{2.6}$$

Donde:

I_o = Corriente de salida del conversor digital / análogo (Pin 4: NTE 2056)

V_{REF+} = Voltaje de referencia para la conversión digital / análogo

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ = 8 bits de los datos de EC o pH.

$A_N = "1"$ si A_N está en nivel alto (5V)

$A_N = "0"$ si A_N está en nivel bajo (0V)

Como se detalló anteriormente, el C.I. AD694 tiene disponible (Pin 7) un voltaje de referencia de 10 V, el mismo que será el voltaje de referencia (Pin 14 del C.I. NTE 2056) del conversor digital / análogo. A plena escala la corriente de referencia (corriente de salida) típica para el Pin 14 es de $2\text{mA}^{2.7}$, entonces:

$$R3 = \frac{V_{REF+}}{I_{REF+}}$$

$$R3 = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ mA}}$$

^{2.6} NATIONAL DATA ACQUISITION DATABOOK, DAC 0808, Pg. 3-20

^{2.7} NATIONAL DATA ACQUISITION, DAC 0808, ELECTRICAL CHARACT. PG. 3-16

$$R3 = 5 \text{ K}\Omega$$

El voltaje de trabajo del C.I. AD694 será de 0V a 10V, entonces la señal de corriente I_o es convertida a una señal de voltaje, a través de un conversor corriente a voltaje, como se muestra en el circuito de la Figura 2.23 (C.I. LF 351, y R2). La Ecuación 2.8 de este conversor es la siguiente:

$$V_{+SIG} = - I_o * R2 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

V_{+SIG} = Voltaje de salida del conversor corriente a voltaje

I_o = Corriente de salida del conversor digital / análogo

A plena escala se tiene:

$$V_{+SIG} = 10V$$

$$I_o = - 2mA$$

Entonces reemplazando V_{+SIG} e I_o en la Ecuación 2.8, se tiene:

:

$$R2 = \frac{- V_{+SIG}}{-I_o}$$

$$R2 = \frac{- 10 V}{- 2 \text{ mA}}$$

$$R2 = 5 \text{ K}\Omega$$

2.3.4.2 Transmisión de Datos

La segunda etapa tiene como entrada el voltaje V_{+sig} (0 a 10 V) proveniente de la primera etapa. Como se explicó anteriormente, el circuito integrado AD694 es el que convierte este valor de voltaje en una señal de corriente de 4 a 20 mA, el C.I. va a operar con un voltaje de 10V a fondo de escala (EC = 10ms o pH = 14). El amplificador de entrada del C.I. AD694 es conectado como un seguidor de voltaje, conectando FB (Pin1) a -SIG (Pin 2), de tal manera que la señal de entrada esté en la entrada no inversora (Pin 3) del amplificador de protección del AD694. La Figura 2.24 muestra el circuito de la transmisión de datos.

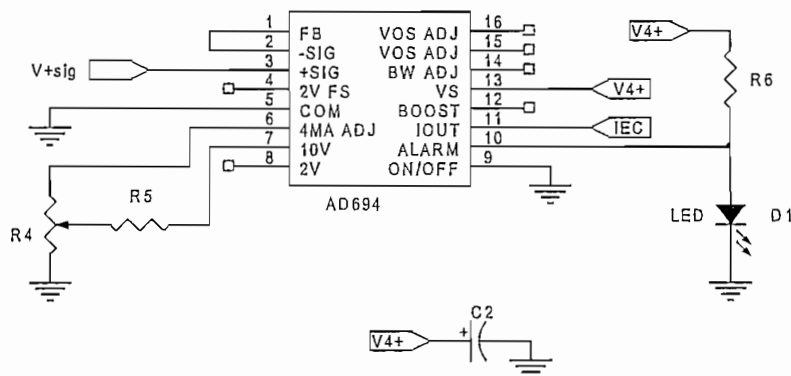


Figura 2.24. Circuito de transmisión

El generador de offset de 4 mA debe ser habilitado (para transmitir de 4-20 mA), esto se lo hace conectando el Pin 5 a tierra. El generador offset de 4mA puede ser ajustado entre 2 mA a 4.8 mA. Este ajuste se lo hace a través de un divisor de voltaje (R4 y R5). Para encontrar el valor de estas resistencias, primero se selecciona valor de X , que es la fracción de ajuste de los 4 mA, y el Voltaje de referencia (V_{ref}), que para nuestro diseño es 10 V. Estos valores se sustituyen en las siguientes ecuaciones:

$$R4 = 180\Omega (1 / X - 4.5) \quad 2.8$$

$$R5 = 500\Omega [(V_{ref} / 1.22 \text{ V}) - 0.18 - 0.82X] [1/X - 4.5] \quad 2.9$$

Se asume una fracción de ajuste del 3% ($X = 0.03$), y el Voltaje de referencia que se está utilizando es de 10V. Entonces se tiene:

$$R4 = 180\Omega (1 / 0.03 - 4.5) = 5190 \Omega$$

$$R5 = 500\Omega [(10V / 1.22 \text{ V}) - 0.18 - 0.82 * 0.03] [1/0.03 - 4.5] = 115 \text{ K}\Omega$$

Estas resistencias pueden ser redondeadas proporcionalmente a un valor más bajo. Al final se utilizó un potenciómetro $R4 = 5\text{K}\Omega$, y una resistencia $R5 = 111 \text{ K}\Omega$.

Entonces, para un nivel cero (4 mA) de las magnitudes de EC y pH se puede calibrar el transmisor a través del potenciómetro R4.

El C.I. AD694 tiene un circuito de alarma que advierte condiciones de lazo abierto en I_{out} (Pin 11 del C.I. AD 694), o un voltaje superior a $V_s - 2V$ en I_{out} . Esta alarma puede proveer una señal TTL (Pin 10 del C.I. AD 694) a un controlador. En el circuito de la Figura 2.24 se observa este circuito. La alarma está apagada en operación normal, el voltaje sobre el pin de alarma es alto, por lo que el LED se enciende. En una operación incorrecta, el voltaje en el pin de alarma es bajo, por lo que el LED se apaga. El LED está conectado a este circuito lógico a través de una resistencia pull-up de $33\text{K}\Omega$ (para una corriente sobre el LED de { 1 mA).

^{2.8} ANALOG DEVICES. DATA SHEET. AD694, 4-20 mA Transmisor. Pg. 8

^{2.9} ANALOG DEVICES. DATA SHEET. AD694, 4-20 mA Transmisor. Pg. 8

El C.I. AD694 puede operar con una máxima carga de:

$$R_L = \frac{(V_s - 2V)}{20 \text{ mA}}$$

Donde:

$$V_s = 24V$$

Entonces, se tiene:

$$R_{L \text{ máx}} = \frac{(24 - 2V)}{20 \text{ mA}}$$

$$R_{L \text{ máx}} = 1100 \Omega$$

La máxima carga a la que puede operar el transmisor es de:

$$R_{L \text{ máx}} = 1100 \Omega$$

Luego de finalizar con el diseño de las diferentes etapas del transmisor de Electroconductividad y pH, en las siguientes Figuras se muestran cada uno de los circuitos diseñados en este Capítulo.

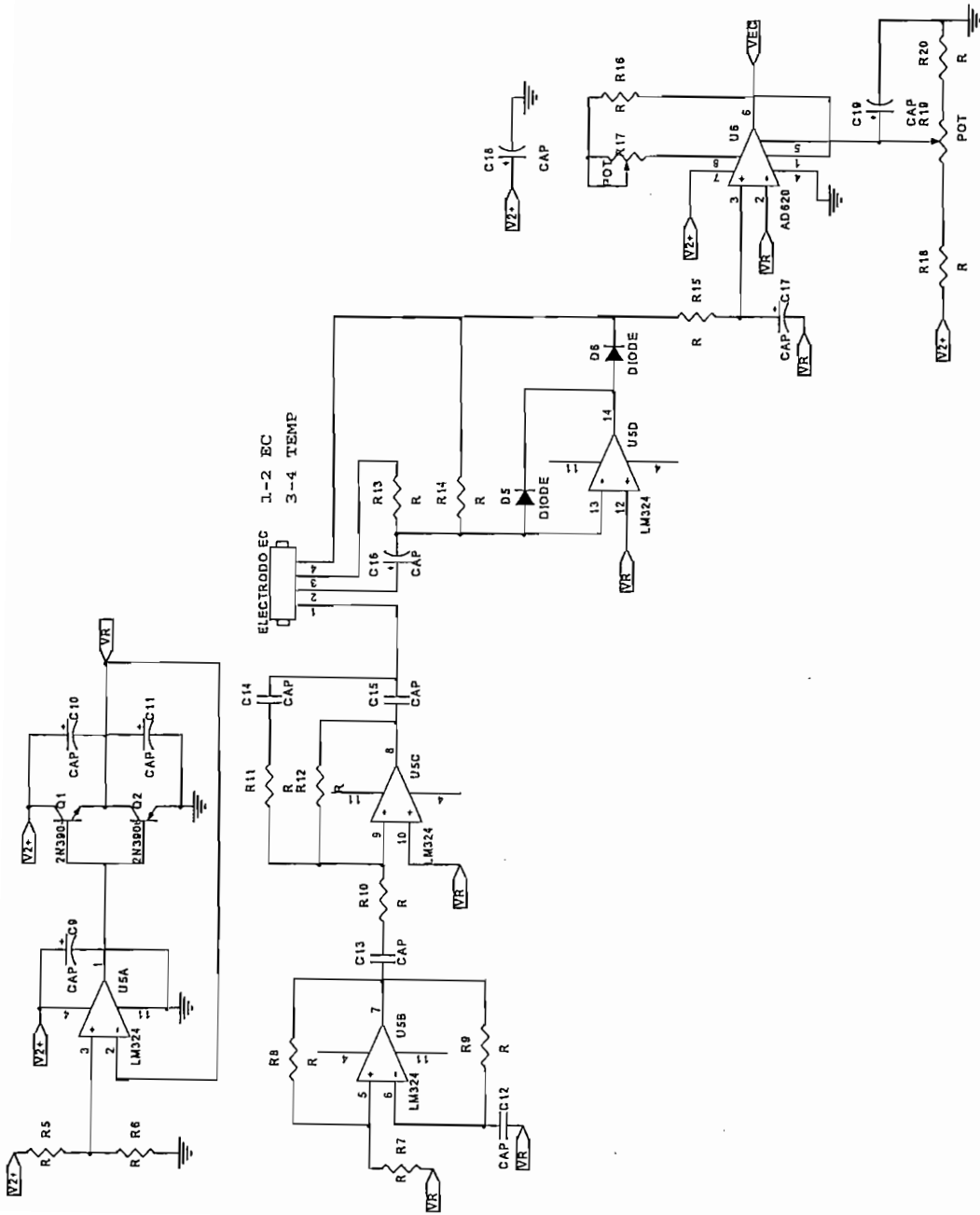


Figura 2.25 Circuito Acondicionador de EC

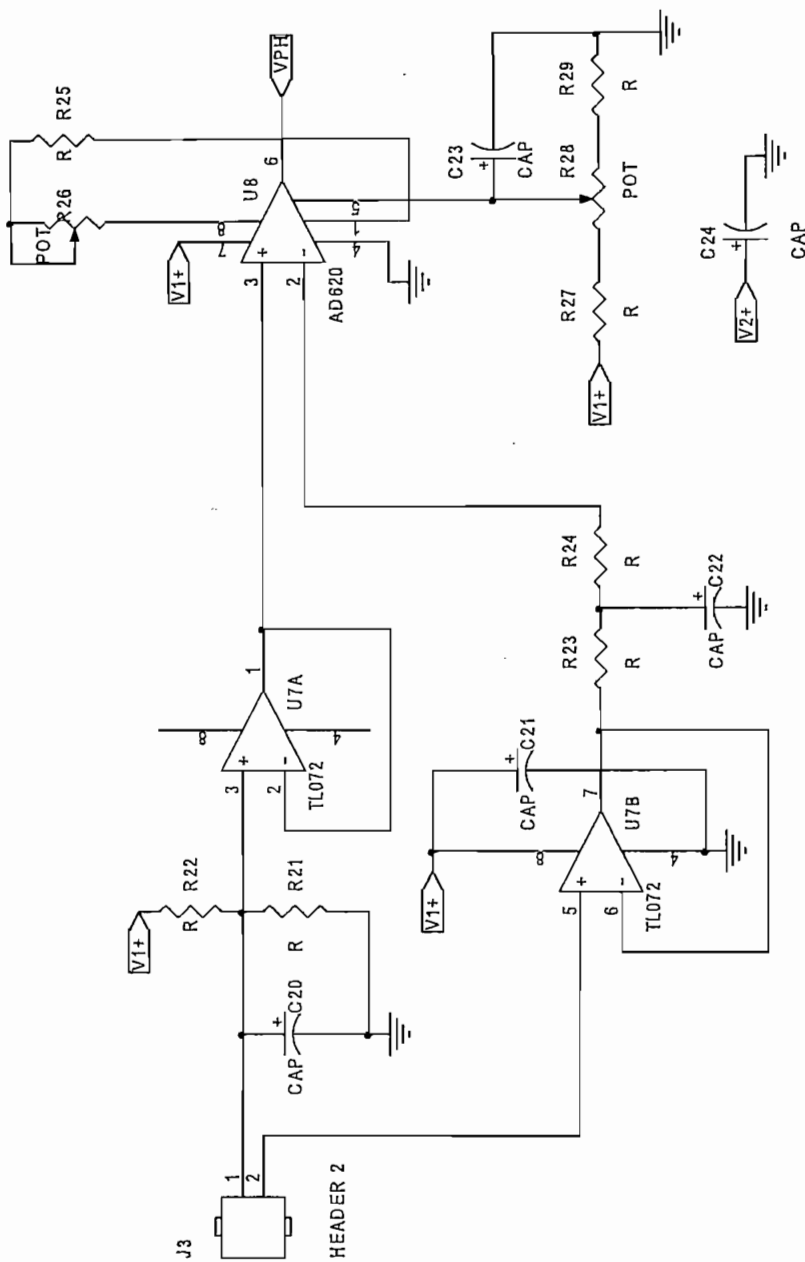


Figura 2.26 Circuito acondicionador de pH

CAPITULO 3



DESARROLLO DEL SOFTWARE DE SOPORTE

CAPITULO 3.

Entre las partes fundamentales del sistema de medición que aquí se diseña está la posibilidad de manipular los datos que llegan de los acondicionadores. Debido a que los sensores tienden a perder sus características iniciales con el uso, el instrumento tiene la posibilidad de autocalibrarse con la ayuda de substancias patrones tanto de electroconductividad como de pH.

Las especificaciones de medida que se busca obtener del instrumento se detallan en la Tabla 3.1:

MAGNITUD	RANGO	RESOLUCION	Características
EC	0.0 a 10.0 ms /cm	0.1 ms / cm	Compensación a 25 °C
PH	0.0 a 14	0.1	Sin compensación de Temp.

Tabla 3.1. Especificaciones del transmisor.

En este Capítulo se describe y desarrolla el programa para el microcontrolador PIC en lenguaje ensamblador (TESIS.ASM) el mismo que luego de ser compilado (TESIS.HEX), es grabado en la memoria de programa del PIC 16F872. El programa ejecuta todas las tareas antes mencionadas y realiza todo lo que se refiere a la conversión analógica/digital de las variables a sensar.

Un ciclo de programa tiene la siguiente secuencia. El microcontrolador inicia con el despliegue de información sobre el transmisor. Ejecuta la conversión análoga/digital de los valores de EC y pH de las entradas análogas, los mismos que son guardados en la memoria RAM del microcontrolador. Los datos son visualizados en el módulo LCD y son enviados a un puerto para transmitirlos. El

microcontrolador lee el teclado, y si una tecla fue presionada ejecuta su respectiva tarea, en caso contrario se reinicia el programa.

Antes de entrar en una explicación detallada del programa, se creó conveniente dar una idea de lo que el mismo puede realizar, modos de calibración del transmisor, y opciones que presenta el instrumento con respecto al software.

3.1 FUNCIONES DEL TRANSMISOR

Cuando el transmisor se enciende, en el módulo LCD se visualiza los siguientes mensajes iniciales:



TRANSMISOR

Por 1.5 segundos



EC pH

Por 1.5 segundos

Seguidamente, se visualiza los valores de EC y pH de las lecturas de ambos sensores, con el siguiente formato. Estos valores también son transmitidos a distancia.



EC 1.4 pH 7.0

El transmisor posee 4 pulsadores, para las distintas calibraciones que son:



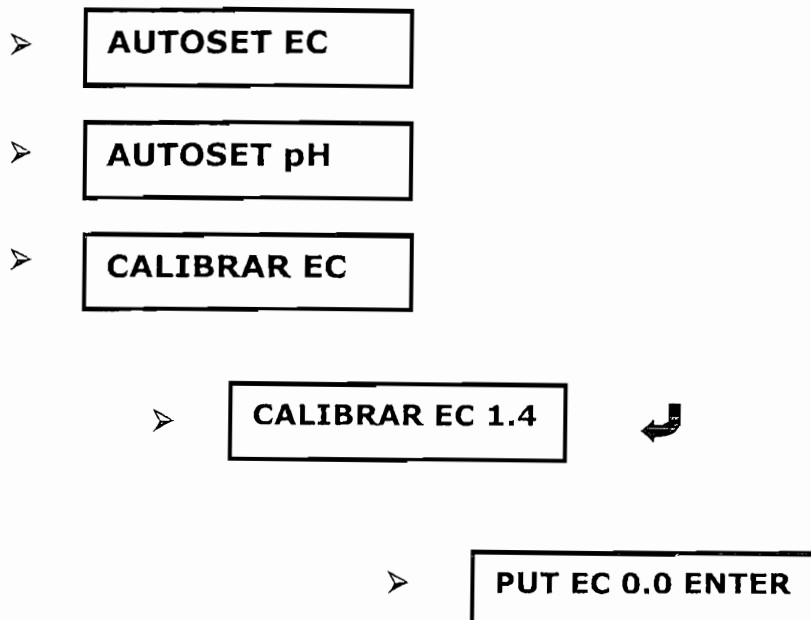
A continuación se explica la función de cada una de las teclas.

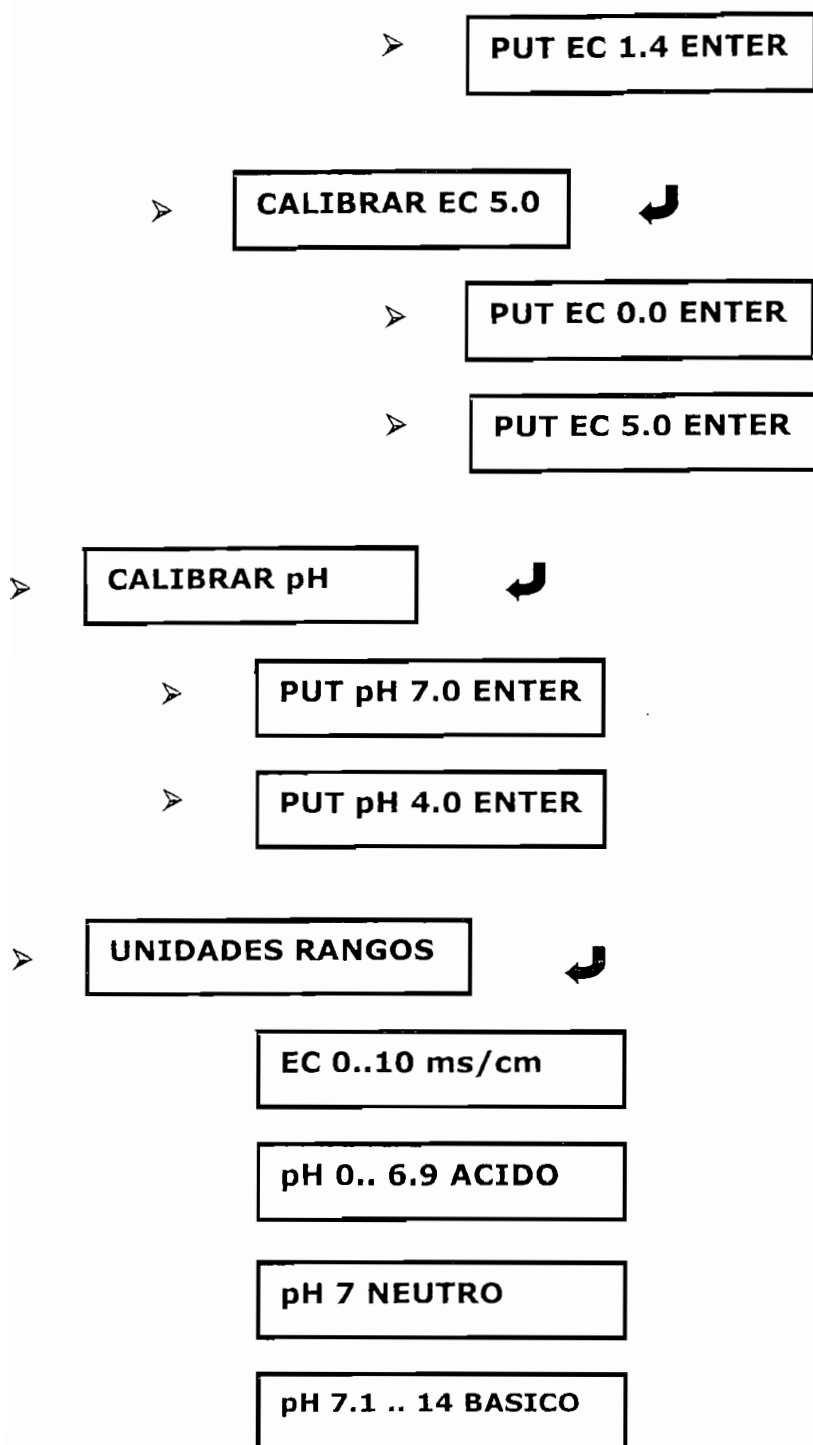
ESC:

Al presionar esta tecla se anula cualquier opción que se ha elegido.

MENU:

Al elegir esta opción, se van desplegando las siguientes opciones al ir pulsando la tecla *SELECT*:





SELECT:

Con esta tecla se pueden ver todas las opciones que presenta el menú.

ENTER:

Al presionar esta tecla se ejecuta o se acepta una opción que se ha escogido dentro del MENU.

3.2 MODOS DE CALIBRACION DE EC Y pH

Se ha desarrollado un programa de modo que el transmisor posea dos modos de calibración, para cada magnitud, que son:

- Modo de calibración: "AUTOSET EC."
- Modo de calibración: "CALIBRAR EC."
- Modo de calibración: "AUTOSET pH."
- Modo de calibración: "CALIBRAR pH."

A continuación se explica detalladamente cada una de las opciones de calibración del transmisor.

3.2.1 MODO DE CALIBRACIÓN "AUTOSET EC, AUTOSET pH"

El modo de calibración "AUTOSET...", tanto para la electroconductividad (EC) como para el pH, escoge la pendiente y desplazamiento de las curvas desde la memoria EEPROM. Estos valores pueden ser modificados, si se cambian los mismos en el programa. Para encontrar estos valores se ha utilizado sensores que no han perdido sus características iniciales, y con la ayuda de sustancias buffer, se ha medido el voltaje que genera el circuito de acondicionamiento respectivo, para luego transformar estos valores a códigos hexadecimales, que son guardados en la memoria EEPROM. Al escoger este modo de calibración, no se debe utilizar ninguna sustancia buffer. Se puede decir que esta opción es equivalente a llevar el medidor a sus valores "por defecto".

3.2.2 MODO DE CALIBRACIÓN “CALIBRAR EC”

El modo “CALIBRAR EC”, tiene dos opciones. La primera utiliza sustancias buffer de 5.0 ms y 0.0 ms, la segunda usa sustancias buffer de 1.4ms y 0.0 ms. Esta segunda opción es la más utilizada, debido a que la sustancia buffer de 1.4ms es más común en el mercado.

El procedimiento para la calibración en las dos opciones es el mismo. Primeramente se escoge la opción “CALIBRAR EC”, se introduce el sensor de EC en la sustancia buffer de EC = 0.0 y se presiona la tecla **ENTER**. El transmisor espera 10 segundos (en el módulo LCD se visualiza el mensaje “ESPÈRE...”) hasta tomar el dato del sensor. Luego se introduce la segunda sustancia buffer de EC= 5.0ms ó EC = 1.4 ms y se presiona la tecla **ENTER**; el transmisor, transcurrido 10 segundos, lee el dato del sensor. El procedimiento para la calibración ha terminado.

3.2.3 MODO DE CALIBRACIÓN “CALIBRAR pH”

Para obtener mediciones de pH precisas, es necesario calibrar el sistema de medición. La calibración se efectúa colocando la celda electroquímica en una solución tampón con el valor de pH adecuado, ya sea para una condición ácida o alcalina. Al seleccionar la opción de “CALIBRAR pH”, el instrumento pide colocar la celda en la solución tampón de valor pH = 7.0, seguidamente se debe presionar la tecla **ENTER** y esperar 10 segundos (en el módulo LCD se visualiza “ESPERE..”) hasta que se tome la lectura del sensor. Luego se debe introducir la sustancia con un valor de pH = 4.0, y se sigue el mismo procedimiento anterior. Si las sustancias buffer que se han utilizado tienen sus características iniciales correctas, el procedimiento ha terminado, caso contrario, se visualiza en el módulo LCD un mensaje de “LIQUIDO POBRE”, con lo que se cancela la calibración.

Durante la calibración, se recomienda que las celdas se limpien perfectamente en agua destilada. Las soluciones tampón existen comercialmente o se pueden preparar para cada valor pH ó EC que se va a usar en la calibración. Las celdas se deben enjuagar varias veces en agua destilada antes de ponerse en una nueva solución y dejar que se estabilice cada una de ellas durante la calibración. Una gota o dos de una solución tampón en otra hace que el valor el pH ó EC cambien y esto produce un error en la calibración. Los buenos electrodos se hacen muy estables después de unos días de operación, de manera que, con los que tienen buena calidad, basta hacer una calibración para varios días o semanas, según la aplicación.

Con el desarrollo de circuitos de estado sólido más estables, la confiabilidad y la precisión de la medición se incrementarán y esto creará la necesidad de nuevos tipos de electrodos y mejores técnicas de mantenimiento.

El programa puede cancelar automáticamente una calibración ya sea de Electroconductividad ó pH. Esto debido a que las sustancias patrones que se utilizan para la calibración no tienen los valores de EC y pH adecuados. El mensaje que se despliega es:



LIQUIDO POBRE

Luego de ello, el transmisor regresa a su calibración anterior.

Cuando una calibración ha sido aceptada, se despliega:



OK!

3.2.4 CALCULO DE LOS VALORES DE ELECTROCONDUCTIVIDAD y pH

El modelo matemático que se ha elegido para el cálculo de los valores de EC y pH es la de la ecuación de una recta, donde el desplazamiento y la pendiente son los datos necesarios para encontrar dichos valores. Tanto para la EC y pH se necesitan dos sustancias buffer por cada una para la respectiva calibración. Las ecuaciones para ambas magnitudes son las mismas, por lo que se detalla el modelo matemático del pH solamente como ejemplo.

3.2.4.1 Modelo matemático para calcular el pH

Al sumergir el sensor de pH en la sustancia buffer de 7.0, este valor de voltaje es convertido a digital y almacenado en la variable DATO1PH. En la variable DATO2PH es almacenado el valor digital de la lectura con la sustancia buffer de pH=4.0. Conociendo estos valores, se procede a calcular los valores de desplazamiento y pendiente de la recta.

En la Figura 3.1 se detalla este procedimiento

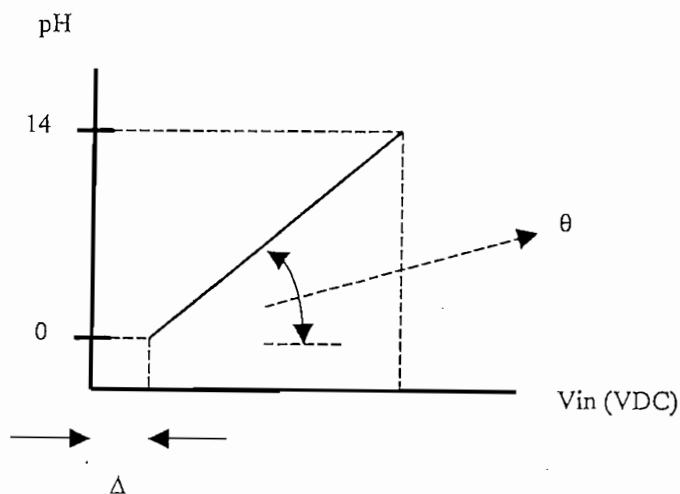


Figura 3.1 Ecuación de una recta

De la Figura 3.1 se obtiene la Ecuación 3.1

$$\text{pH} = M * V_{in} + \Delta \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

V_{in} = Voltaje de entrada al ADC del microcontrolador (0 VDC – 5V D.C.)

Δ = Desplazamiento

θ = Angulo de la Pendiente

M = Pendiente

Para abreviar las ecuaciones matemáticas se utiliza la siguiente nomenclatura:

Vd_{in} = Valor digital leído del sensor de pH.

$Vd7$ = Valor digital de la calibración a pH = 7.0

$Vd4$ = Valor digital de la calibración a pH = 4.0

$Vd0$ = Valor digital a pH = 0.0 (esto para facilidad en los cálculos)

Para las dos lecturas de la calibración del pH, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$70 = M * Vd7 + \Delta \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$40 = M * Vd4 + \Delta \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Restando la Ecuación 3.3 de la Ecuación 3.2, se obtiene la Ecuación 3.4:

$$30 = M * (Vd7 - Vd4) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Para facilitar los cálculos se procede a calcular el valor digital Vd0 a pH = 0.0, utilizando la Ecuación 3.1, de lo que se obtiene:

$$Vd0 = - \Delta / M \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Despejando Δ de la Ecuación 3.3, y M de la Ecuación 3.4, y reemplazando las mismas en la Ecuación 3.5, se obtiene la Ecuación 3.6 (Vd0), que es calculada en el microcontrolador.

$$Vd0 = Vd4 - \frac{(Vd7 - Vd4)}{30} * 40 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Con el valor de Vd0 calculado en el microcontrolador, se procede a calcular el valor del pH para cualquier valor digital. Para pH = 0 se tiene la Ecuación 3.7:

$$0 = M * Vd0 + \Delta \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

$$\Delta = - \frac{M}{Vd0} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Restando la Ecuación 3.7 de la Ecuación 3.2, y despejando M se obtiene la Ecuación 3.9:

$$M = \frac{70}{(Vd7 - Vd0)} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Reemplazando la Ecuación 3.8 y 3.9 en la Ecuación 3.1, se obtiene la expresión final (Ecuación 3.10), que utiliza el programa para realizar el cálculo de los valores de pH.

$$\text{pH} = \frac{(\text{Vd}_{in} - \text{Vd0})}{(\text{Vd7} - \text{Vd0})} * 70 \quad \text{Ecuación 3.10}$$

3.2.4.2 Modelo matemático para calcular la Electroconductividad

El procedimiento para el cálculo de los valores de EC es el mismo que para el pH. Las expresiones finales son las Ecuaciones 3.11 y 3.12:

Calibración con solución buffer de EC = 1.4 ms

$$\text{EC} = \frac{(\text{Vd}_{in} - \text{Vd0})}{(\text{Vd14} - \text{Vd0})} * 14 \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Calibración con solución buffer de EC = 5.0 ms

$$\text{EC} = \frac{(\text{Vd}_{in} - \text{Vd0})}{(\text{Vd50} - \text{Vd0})} * 50 \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde:

Vd_{in} = Valor digital leído del sensor de EC.

Vd14 = Valor digital de la calibración a EC = 1.4

Vd50 = Valor digital de la calibración a EC = 5.0

Vd0 = Valor digital de la calibración a EC = 0.0

3.3 DESARROLLO DEL PROGRAMA EN EL MICROCONTROLADOR

El microcontrolador que se optó por elegir, el *PIC 16F872*, ofrece las suficientes prestaciones para desarrollar este proyecto. Entre las características más importantes tiene:

- Tamaño reducido (28 pines)
- Se alimenta con un voltaje de corriente continua de 2.0 V a 5.5 V
- Consumo mínimo: < 2 mA @ 5V, 4 MHz
- Dispone de 33 instrucciones
- 2K x 14 palabras de memoria de programa FLASH
- 128 x 8 bytes de memoria de datos (RAM)
- 64 x 8 bytes de memoria de datos EEPROM
- Timer 0: 8-bit timer/counter
- Timer 1: 16-bit timer/counter
- Timer 2: 8-bit timer/counter
- PWM, Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT), Watchdog Timer (WDT).
- Conversor Análogo/Digital de 10 bits.
- 3 Puertos I / O
- 5 canales de entradas analógicas.
- Comunicación Serial.
- 10 Interrupciones

El programa en el microcontrolador está basado de un programa principal y en varias subrutinas, además se tiene una subrutina especial de atención a la interrupción interna invocada por el fin de conversión del conversor AD.

Antes de comenzar a describir cada una de las partes del programa grabado en el microcontrolador, es muy importante calcular el tiempo de cada ciclo de

máquina, el cual está dado por la frecuencia del cristal que se usa. Es importante el cálculo del ciclo de máquina, ya que de esta forma se sabrá el tiempo que se demora en ejecutar el microcontrolador una subrutina o todo el programa. Para esta familia de microcontroladores PIC un ciclo de máquina es cuatro veces el periodo de oscilación del cristal (T_{osc}).

Para el microcontrolador PIC se ha utilizado un cristal de 3.579545 MHz, entonces la duración de un ciclo de máquina será:

$$T_{osc} = \frac{1}{F_{osc}}$$

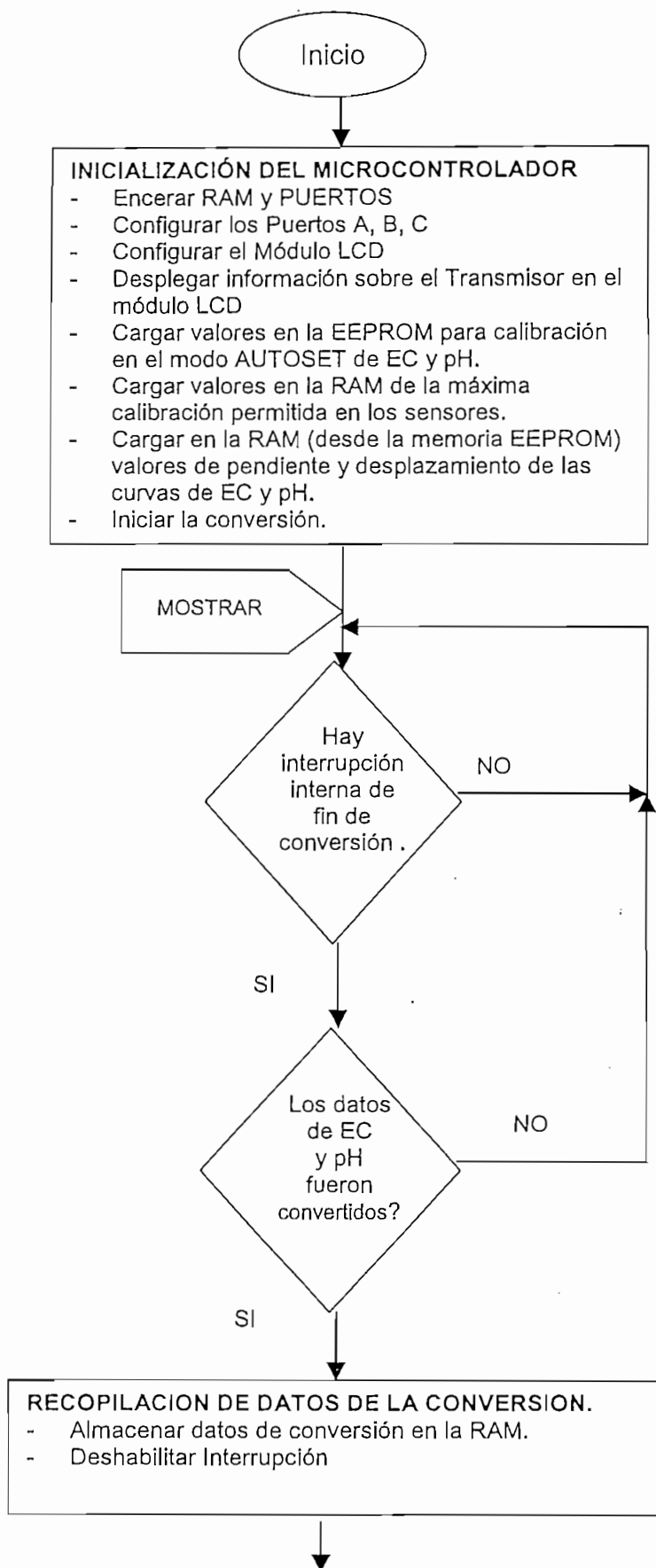
$$T_{osc} = \frac{1}{3.579545 \text{ MHz}} = 0.2759 \mu s$$

$$T_{CM} = 4 * T_{osc} = 4 * 0.2759 \mu s = 1.12 \mu s$$

Una instrucción puede ser ejecutada de 1 ó 2 ciclos de máquina, dependiendo del tipo de instrucción.

3.3.1 PROGRAMA PRINCIPAL

Con el diagrama de flujo mostrado en la Figura. 3.1. se ilustra el funcionamiento del programa grabado en la memoria de programa interna del microcontrolador.



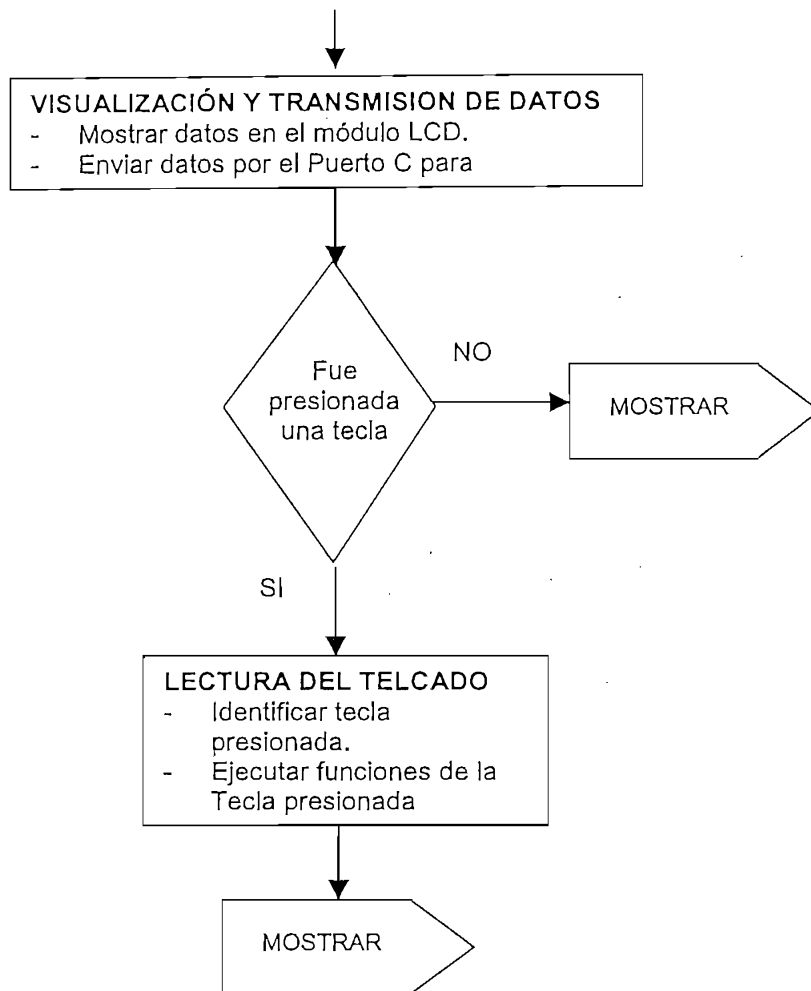


Figura 3.1. Diagrama de Flujo del Programa Principal.

En el programa principal (luego de la definición de etiquetas en la RAM) se empieza por inicializar el microcontrolador, esto es:

INICIALIZAR EL MICROCONTROLADOR

1.- Encerar las localidades de memoria RAM desde la H '20' hasta H '7F'.

Estas posiciones de memoria se utilizan para:

- Almacenar datos de las conversiones ADC.
- Control del módulo LCD
- Registros de tiempo
- Registros para operaciones matemáticas
- Registros para el teclado
- Datos de las curvas de EC y pH
- **FIN DE TAREA**

La secuencia de instrucciones que realiza esta tarea se detalla a continuación:

```

        BCF      STATUS,RP0 ;SELECCIONAR BANCO0
        BCF      STATUS,RP1
        MOVLW    H'0020'
        MOVWF    FSR
NEXT    CLRF     INDF      ;ENCERAR LA MEMORIA RAM DESDE LA
        INCF     FSR,F     ;LOCALIDAD 20H A LA LOCALIDAD 7F
        BTFSS   FSR,7
        GOTO    NEXT

```

2.- Encerar los puertos A,B,C del microcontrolador.

La secuencia de instrucciones que se utilizan para realizar esta tarea son:

```

        CLRF     PORTB    ;ENCERAR TODOS LOS PUERTOS
        CLRF     PORTA
        CLRF     PORTC

```

La distribución de los periféricos en los puertos es la siguiente:

– **PUERTO A:**

- RA0: Entrada analógica de EC
- RA1: Entrada analógica de pH

- RA2: Control del módulo LCD
 - RA3: Habilitación del LATCH para salida de datos de EC
 - RA4: Habilitación del LATCH para salida de datos de pH
 - RA5: Habilitación del módulo LCD
- **PUERTO B:**
- RB0..RB7: Puerto destinado al manejo de teclado y el módulo LCD
- **PUERTO C:**
- RC0..RC7: Puerto destinado a la transmisión de datos de EC y pH
- **FIN DE TAREA:**

3.- Configurar los Puertos para el manejo de los periféricos.

La secuencia de instrucciones que se utilizan para realizar esta tarea son:

```

MOVLW    B'00000100'    ;CONFIGURAR PUERTO A COMO: D,D,VREF+,D,A,A
MOVWF    ADCON1         ;6 BITS MENOS SIGNIFICANTE DE ADRESL SON 0
MOVLW    B'11000011'    ;CONFIGURAR: RA<2.4.5> SALIDAS RA<0.1.3> ENTRADAS
MOVWF    TRISA
MOVLW    B'00000000'    ;CONFIGURAR RB<0..7>SALIDAS
MOVWF    TRISB
MOVLW    B'00000000'    ;CONFIGURAR RC<0..7>SALIDAS
MOVWF    TRISC

```

Cabe aclarar que estos se configuran de acuerdo a que periféricos manejan:

– **CONFIGURAR PUERTO A:**

- RA <2.3.4.5> Salidas, RA <0.1.> Entradas. El registro que se configura es TRISA. Setear un bit, hace que este sea de entrada
- Configurar registro ADCON1. Este registro contiene los siguientes bits:

ADFM	.....	.....	.....	PCFG3	PCFG2	PCFG	PCFG
						1	0
Bit7							Bit 0

ADFM: El conversor del microcontrolador es de 10 bits, que son almacenados en dos localidades de memoria: ADRESH y ADRESL. Con el registro ADFM podemos escoger el formato del resultado del conversor, ya sea los 6 bits más significativos de ADRESH sean 0, ó los 6 bits menos significativos de ADRESL sean 0.

PCFG <3:0>: Los 4 bits se utilizan para configurar los bits del puerto A, los cuales pueden ser análogos ó digitales

- RA <2.3.4.5> son salidas digitales. RA <0.1> son entradas análogas.

– **CONFIGURAR PUERTO B:**

- RB <0..7> Salidas digitales. El registro que se configura es TRISB.

– **CONFIGURAR PUERTO C:**

- RC <0..7> Salidas digitales. El registro que se configura es TRISC.

– **FIN DE TAREA**

4.- Configurar el Módulo LCD.

Este proyecto utiliza un módulo LCD 1x16 (1 línea x 16 caracteres), que es manejado por los siguientes bits del microcontrolador:

- RA2: Si el bit es 1.- Indica que el dato es un caracter.
Si el bit es 0.- Indica que el dato es un comando.
- RA5: Si el bit es 1.- Habilita el módulo LCD
Si el bit es 0.- Deshabilita el módulo LCD.

La interface entre el microcontrolador y el módulo LCD se la hará con el bus de datos trabajando a 8 bits. El bus de datos que se utiliza en el PUERTO C.

Al módulo LCD se lo configura de la siguiente manera:

- LCD con una interface de 8 Bits.
- Mensaje no rota.
- Encerar el módulo LCD
- Prender el módulo LCD
- FIN DE TAREA.

Las subrutinas que se utilizan para configurar el módulo LCD y escribir un caracter son las siguientes:

```

*****
;
;SUBROUTINA PARA EL CONTROL DEL MODULO LCD
*****
CONTLCD

        BCF          STATUS,RP1          ;SELECCIONAR BANCO1
        BSF          STATUS,RP0
        MOVLW       H'0000'             ;PORTB COMO SALIDAS DIGITALES
        MOVWF       TRISB
        MOVLW       D'56'              ;INICIAR LCD 8BITS
        CALL        CONTROL

```



```

MOVLW    D'6'                ;MENSAJE NO ROTA
CALL     CONTROL
MOVLW    D'1'                ;BORRAR LCD
CALL     CONTROL
MOVLW    D'12'               ;PRENDER LCD
CALL     CONTROL
RETURN

```

```

;*****
;SÚBRUTINA PARA EL CONTROL DEL MODULO LCD POR LOS PINES
;RA2, RA5 A LOS PINES E,RS DEL MODULO
;*****

```

CONTROL

```

        BCF     STATUS,RP0    ;SELECCIONAR BANCO 0
        BCF     PORTA,RS      ;DATO ES SEÑAL DE CONTROL
        GOTO    DATO2
DATO    BSF     PORTA,RS      ;DATO ES MENSAJE
DATO2   BSF     PORTA,E
        BSF     STATUS,RP0    ;CAMBIAR A BANCO1
        CLRF    TRISB        ;RB<0..7>SALIDAS
        BCF     STATUS,RP0
        MOVWF   PORTB
        CALL    RETARDO
        BCF     PORTA,E
        CALL    RETARDO
        RETURN

```

5.- Desplegar información en el módulo LCD sobre el transmisor.

El mensaje que aparece en el visualizador cuando se enciende el Transmisor es:

- "TRANSMISOR". Durante 1 segundo
- "EC pH". Durante 1 segundo.

En general para mostrar un mensaje en el módulo LCD, se sigue la siguiente secuencia de programa.

- Llamar a la subrutina del mensaje que se desee desplegar.
- La subrutina del mensaje indica la posición de memoria y el número de caracteres donde se encuentra el mensaje.
- Llamar a la subrutina para mostrar un carácter en el módulo LCD.
- **FIN DE TAREA.**

Estas subrutinas se muestran a continuación:

```

;*****
;SUBROUTINA PARA MOSTRAR UN MENSAJE
;*****
ESCRIBIR
        MOVWF     CONTCAR
        BCF      STATUS,Z
CICLO1  MOVF      CONTCAR,0
        CALL     MOSTRAR
        INCF     CONTCAR,DEC
        MOVF     NUMCAR,0
        XORWF    CONTCAR,0
        BTFSS   STATUS,Z
        GOTO    CICLO1
        RETURN

```

```

;*****
;SUBROUTINA PARA MOSTRAR UN CARACTER EN LA PANTALLA
;*****
MOSTRAR
        CALL     DATO
        MOVLW   H'001F'      ;RETARDO ENTRE CARACTERES
        MOVWF   RETCAR
RETA1  CALL     RETARDO
        DECFSZ  RETCAR,DEC
        GOTO    RETA1
        RETURN

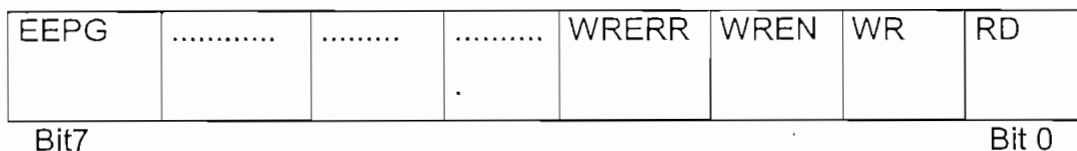
```

6.- Guardar los valores en la memoria EEROM de la calibración del transmisor en el modo AUTOSSETEC y AUTOSSETPH.

La escritura de valores en la EEPROM, se la realiza a través de la subrutina WRITEEEPROM, que se detalla a continuación.

SUBROUTINA WRITEEPROM:

- Escribir la posición de memoria que se desea guardar en el registro EEADR.
- Configurar el registro de control para acceder a la memoria. A continuación se detalla el registro y la configuración.



EEPG: Determina si el acceso será a memoria de datos o memoria de programa. Para escribir datos, el bit será 0.

WREN: Setear este bit para habilitar la escritura en la EEPROM.

WR: Setear este bit para empezar a escribir en la EEPROM. Setear el bit EEPG del registro EECON1 que sirve para acceder a la memoria de datos EEMPROM.

- Habilitar los bits de interrupciones globales GIE y PEIE (están en el registro INTCON).
- Activar bit EEIE del registro PIE2 (interrupción por operación de escritura en la EEPROM).
- Esperar hasta la interrupción por fin de escritura. Hay interrupción? Si: Atender interrupción.
- **FIN DE TAREA.**

La escritura en la EEPROM también se la realiza cuando se almacenan los nuevos valores de calibración para EC y pH. Estos valores son guardados en diferentes localidades de memoria.

La subrutina que realiza esta tarea se la muestra a continuación:

```

;*****
;ESCRIBE UN DATO DE LA MEMORIA EEPROM, EL DATO A ESCRIBIR SE LO
;COLOCA EN DATAWRITE Y LA DIRECCION A ESCRIBIR EN ADRESSWRITE
;*****
WRITEEPROM
    BSF        STATUS,RP1
    BCF        STATUS,RP0                ;CAMBIAR A BANCO2
    MOVF       ADRESSWRITE,0
    MOVWF      EEADR                    ;DIRECCION DEL DATO
    MOVF       DATAWRITE,0
    MOVWF      EEDATA                  ;VALOR A ESCRIBIR
    BSF        STATUS,RP0                ;CAMBIAR A BANCO3
    BCF        EECON1,EEPGD             ;PUNTO A DATO DE MEMORIA
    BSF        EECON1,WREN              ;HABILITAR ESCRIBIR
    BCF        INTCON,GIE               ;DESABILITAR INTERRUPCIONES
    MOVLW     H'0055'
    MOVWF      EECON2
    MOVLW     H'00AA'
    MOVWF      EECON2
    BSF        EECON1,WR
    BSF        INTCON,GIE                ;HABILITAR INTERRUPCIONES
    BSF        INTCON,PEIE
    BSF        STATUS,RP0
    BCF        STATUS,RP1
    BSF        PIE2,EEIE
    BCF        STATUS,RP0
    BCF        STATUS,RP1                ;CAMBIAR A BANCO0

ESPEROW
    BTFSS     PRIMERO,2
    GOTO      ESPEROW                    ;FIN DE ESCRITURA
    BCF       PRIMERO,2
    BSF       STATUS,RP0
    BCF       PIE2,EEIE
    BCF       STATUS,RP0
    BCF       STATUS,RP1
    RETURN

```

7.- Cargar en la memoria RAM (desde la memoria EEPROM) los valores para el cálculo de los niveles de EC y pH.

Los datos son leídos desde la memoria EEPROM. Los datos que se leen son:

- Bit 0 de la localidad H'00' de la memoria EEPROM. Si el bit es 1, entonces utilizar los datos de la autocalibración con sustancias patrones. Si el bit es 0, utilizar la autocalibración AUTOSSETEC.

Para el pH, se utiliza la localidad H'09' con la misma lógica.

La Tabla 3.2 detalla las localidades que se leen en la memoria EEPROM.

<i>Localidad</i>	<i>Dato de calibración modo AUTOSSET</i>
H'01'	Pendiente EC
H'02'	Desplazamiento EC
H'07'	Pendiente pH
H'08'	Desplazamiento pH
	<i>Dato de calibración con sustancias patrones</i>
H'04'	Pendiente EC
H'05'	Desplazamiento
H'0A'	Pendiente pH
H'0B'	Desplazamiento pH

Tabla 3.2. Localidades utilizadas en la memoria EEPROM.

Para leer estas localidades se utiliza la subrutina READEEPROM, la misma que se detalla a continuación.

SUBROUTINA READEEPROM:

- Escribir la posición de memoria que se desea leer en el registro EEADR.
- Setear el bit EEPG del registro EECON1 que sirve para acceder a la memoria de datos EEPROM.
- Setear el bit RD del registro EECON1 que sirve para habilitar la lectura de datos.
- Guardar el dato leído en el registro EEDATA
- **FIN DE TAREA.**

A continuación se muestran las subrutina READEEPROM.

```

;*****
;SUBURITINA PARA LEER UN DATO DE LA MEMORIA EEPROM
;EL DATO SE LOS ESCRIBE EN EL ACUMULADOR
;*****

READEEPROM

    BSF    STATUS,RP1
    BCF    STATUS,RP0           ;CAMBIO BANCO2
    MOVWF  EEADR              ;DIRECCION DE LA MEMORIA A LEER
    BSF    STATUS,RP0           ;CAMBIO BANCO3
    BCF    EECON1,EEPGD        ;PUNTO A DATO DE MEMORIA
    BSF    EECON1,RD           ;EEPROM READ
    BCF    STATUS,RP0           ;CAMBIO BANCO2
    MOVF   EEDATA,0            ;DATO EN EL ACUMULADOR
    BCF    STATUS,RP0
    BCF    STATUS,RP1           ;REGRESO BANCO0
    RETURN

```

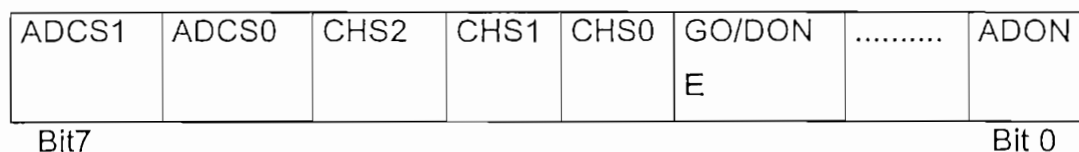
8.- Inicialización y configuración del Conversor Análogo / Digital (ADC).

Para la configuración del ADC del microcontrolador utilizamos la subrutina ADQUISICION la cuál se detalla a continuación:

SUBRUTINA ADQUISICION:

- El Conversor Análogo / Digital del microcontrolador utiliza cuatro registros para su configuración que son:
 - ADRESH: Resultado de la conversión.
 - ARESL: Resultado de la conversión
 - ADCON0: Registro de control del conversor.
 - ADCON1: Registro de control del conversor.
- Configurar el módulo A/D.
 - Configurar el registro ADCON0, que se detalla a continuación.

ADCON0:



ADSC <1:0>: Estos dos bits seleccionan la frecuencia del oscilador para la conversión.

00 = $F_{osc} / 2$

01 = $F_{osc} / 8$

10 = $F_{osc} / 32$

11 = F_{RC}

CHS <2:0>: Estos bits seleccionan el canal análogo.

000 = Canal 0, (RA0 / AN0)

001 = Canal 1, (RA1 / AN1)

010 = Canal 2, (RA1 / AN1)

011 = Canal 3, (RA1 / AN1)

100 = Canal 4, (RA1 / AN1)

GO / DONE: Bit de estado del conversor. Seteando este bit, se empieza la conversión (si **ADON** = 1). Este bit se borra automáticamente por hardware, cuando la conversión ha terminado.

ADON: Al setear este bit se enciende el conversor.

- Para una correcta conversión, el reloj del conversor debe ser seleccionado considerando un tiempo mínimo de conversión por cada bit de $T_{AD} = 1.6 \mu s$.
- La frecuencia del cristal que se utiliza para el microcontrolador es de 3.579545 MHz, por lo que:

$$T_{osc} = \frac{1}{F_{osc}} = 0.28 \mu s .$$

- Se escoge la frecuencia de $F_{osc} / 8$, para asegurar una correcta conversión.

$$T_{AD} = T_{osc} * 8 = 2.24 \mu s . > 1.6 \mu s$$

- Setear el bit ADON, y escoger el canal.
- *Configurar el registro ADCON1.* Este re
 - o Setear el bit ADFM del registro ADCON1, para que el resultado de la conversión sea guardado en los 6 bits más significativos del registro ADRESH y ADRESL.
 - o Setear los 4 bits; *PCFG <3:0>*, del registro ADCON1. Los 4 bits se utilizan para configurar los bits del puerto A como entradas analógicas.
- Borrar la bandera de interrupción por fin de conversión.
- Borrar el bit ADIF del registro PIR1.
- Habilitar la interrupción de periféricos, estos son los bits PEIE y GIE, del registro INTCON.
- Setear el bit ADIE del registro PIE1, para habilitar la interrupción del conversor.
- Setear el bit GO del registro ADCON0, para empezar una nueva conversión.
- **FIN DE TAREA**

A continuación se muestra el listado de programa de esta subrutina.

```

*****
;ADQUISICION DE DATOS DE LOS CONVERSORES
*****
ADQUISICION
BCF          STATUS,RP0 ;CONVERSION ANALOGO DIJITAL EN EL PIC
BCF          STATUS,RP1 ;SELECCIONAR BANCO0
MOVWF       ADCON0      ;FOSC/32, CANAL0,A/D ON

BSF          STATUS,RP0 ;SELECCIONAR BANCO1
MOVLW      B'00000100' ;PUERTO A ES: D,D,VREF+,D,A,A
MOVWF       ADCON1      ;ADRESL (0..5) SON 0
MOVLW      B'11000011' ;RA<2.4.5> SALIDAS RA<0.1.3> ENTRADAS
MOVWF       TRISA
BCF          PIR1,ADIF  ;BORRAR BANDERA DE INTERRUPCION DE A/D
BSF          INTCON,PEIE ;HABILITAR INTERUPCIONES PERIFERICOS
BSF          INTCON,GIE ;HABILITAR INTERRUPCIONES
BSF          STATUS,RP0 ;CAMBIO BANCO1
BSF          PIE1,ADIE  ;HABILITAR A/D INTERRUPCION
MOVLW      H'000F'
MOVWF       RETADC1     ;RETARDO PARA ADQUISICION DATO EC
OTRA DECFSZ  RETADC1,DEC
GOTO       OTRA
BCF          STATUS,RP0 ;CAMBIAR A BANCO0
BSF          ADCON0,GO  ;EMPEZAR CONVERSION
RETURN

```

Continuando con la secuencia del programa principal (Figura 3.1), luego de inicializar el conversor A/D del microcontrolador, se tiene un lazo de espera hasta que se termine con la conversión de las dos entradas analógicas del microcontrolador (voltaje de salida de los acondicionadores de señal). Cuando esta ha finalizado, el programa continúa con la siguiente secuencia de tareas:

RECOPIACION DE DATOS DE LA CONVERSION.

Al finalizar la conversión, el valor de la misma es almacenado en el registro ADRESH (8 bits). La subrutina de INTERRUPCION es explicada más adelante.

SUBROUTINA INTERRUPCION:

En el programa se producen dos tipos de interrupción: La primera es por el fin de conversión del ADC, y la segunda por fin de escritura en la EEPROM (registro PIR2, bandera EEIF).

En diagrama estructurado se muestra la subrutina de atención a la interrupción:

- Guardar los registros ACUMULADOR y STATUS.
- Consultar el tipo de interrupción que se ha producido. El bit EEIF (bandera) del registro PIR2 se activa por fin de escritura en la memoria EEPROM.
 - ◆ Si la interrupción es por fin de conversión
 - ➔ Apagar el convertidor: bit GO (bit 0), del registro ADCON0.
 - ➔ Encerar la bandera de interrupción: bit ADIF, del registro PIR1.
 - ➔ Mover el valor de conversión del registro ADRESH, ya sea al registro VALOREC ó VALORPH, dependiendo de que dato se haya leído.
 - ◆ Si la interrupción es por fin de escritura en la memoria EEPROM
 - ➔ Encerar la bandera de interrupción: bit EEIF, del registro PIR2.
 - ➔ Apagar el modo de escritura en la EEPROM: bit WREN, del registro EECON1.
 - ➔ Setear la bandera PRIMERO, para salir del lazo de espera en la subrutina WRITEEEPROM.
 - ◆ Recuperar los registros ACUMULADOR Y STATUS.
 - ◆ Salir de la subrutina de Interrupción.

➤ FIN DE TAREA

A continuación se muestra la secuencia de instrucciones de esta la subrutina INTERRUPCION.

```

;*****
;SUBROUTINA DE INTERRUPCION POR CONVERSION A/D
;*****
INTERRUPCION
    MOVWF    PILA1        ;GUARDAR ACUMULADOR Y ESTATUS
    MOVF     STATUS,0
    MOVWF    PILA2
    BCF     STATUS,RP0   ;CAMBIAR AL BANCO0
    BCF     STATUS,RP1
    BTFSC   PIR2,EEIF
    GOTO    FINWRITE
    BSF     SELECCION,7
    BCF     ADCON0,0     ;APAGAR EL CONVERTIDOR
    BCF     PIR1,ADIF
    MOVF     ADRESH,0
    BTFSS   PRIMERO,DEC ;SALTAR SI NO ES LA INTERRUPCION
    GOTO    ADCPH

ADCEC
    BSF     SIGUIENTE,0 ;EMPEZAR LA SIGUIENTE CONVERSION
    MOVWF   VALOREC
    GOTO    EXIT

ADCPH
    BCF     SIGUIENTE,0
    MOVWF   VALORPH
    GOTO    EXIT
    FINWRITE ;FIN DE ESCRITURA EN LA EEPROM
    BCF     PIR2,EEIF ;BORRAR BANDERA
    BSF     STATUS,RP0
    BSF     STATUS,RP1 ;CAMBIAR A BANCO3
    BCF     EECON1,WREN
    BCF     STATUS,RP0
    BCF     STATUS,RP1
    BSF     PRIMERO,2  ;SALIR DEL LAZO

EXIT
    MOVF     PILA2,0    ;RECUPERAR ACUMULADOR Y STATUS
    MOVWF   STATUS
    MOVF     PILA1,0
    RETFIE

```

La última parte del programa principal tiene que ver con la visualización y transmisión de datos, que se detalla a continuación:

VISUALIZACIÓN Y TRANSMISION DE DATOS

9.- Lecturas de EC y pH de los dos sensores.

Esto se lo realiza a través de la subrutina NUMEROS, que se detalla a continuación:

SUBROUTINA NUMEROS:

- Apuntar a las direcciones donde están los datos.
- Ejecutar las subrutinas DECIMALEC y DECIMALPH.
- Mover el valor de EC hacia el PUERTO C.
- Habilitar el LATCH de transmisión de valores de EC.
- Habilitar el módulo LCD para la visualización del valor de EC.
- Mover el valor de pH hacia el PUERTO C.
- Habilitar el LATH de transmisión de valores de pH.
- Habilitar el módulo LCD para la visualización del valor de pH.
- **FIN DE TAREA**

La subrutina números, hace el llamado a las subrutinas: DECIMALEC y DECIMALPH, las cuales se encargan de realizar el cálculo de los valores de EC y pH en las ecuaciones respectivas, estas subrutinas tienen operaciones como la suma, multiplicación y división de 16 bits. La subrutina se encarga de guardar los números (3 dígitos por cada valor) a ser visualizado en la módulo LCD.

LECTURA DEL TELCADO

10.- Identificar Tecla presionada.

- Seater el bit RB0.

- Leer los bits RB4 (Tecla ESC), RB5(Tecla MENU), RB6 (Tecla SELECT) y RB7 (Tecla ENTER). Si una tecla fue presionada, ejecutamos la función a realizar de la misma, caso contrario repetimos el ciclo de programa, tal como indica la Figura 3.1.

➤ **FIN DE TAREA.**

Con la ejecución de esta subrutina se finaliza un ciclo de programa. Cabe anotar que no todas las interrupciones y subrutinas se ejecutan en un ciclo de programa. Como por ejemplo si no se presiona una tecla, la subrutina de atención a la misma no se ejecuta.

Para finalizar cabe destacar que el microcontrolador PIC al poseer conversores análogo/digitales disminuye el costo del transmisor, debido a que para realizar las lecturas de los acondicionadores no se utiliza un hardware adicional.

En un futuro podría pensarse en incorporar al programa desarrollado una tercera entrada analógica que podría ser la de otro sensor utilizado en la floricultura. Esta opción permitiría tener un transmisor de mayores prestaciones para el desarrollo de la agricultura a base de la tecnología en nuestro país.

CAPITULO 4



PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

CAPÍTULO 4.

El objetivo de este Capítulo es describir los distintos tipos de pruebas que se realizaron con el transmisor diseñado, así como analizar los resultados obtenidos de cada una de las mismas.

Las pruebas que se realizaron con el transmisor diseñado son las siguientes:

- Pruebas de Electroconductividad y pH **para todo el rango de medición del transmisor**. Estos rangos son:
 - EC (0 ms/cm – 10 ms/cm).
 - pH (0 - 14)

- Pruebas de Electroconductividad y pH **para un rango de aplicación en una floricultura**. Los valores óptimos de EC y pH para esta aplicación están comprendidos dentro de los siguientes rangos:
 - EC (1.5 ms/cm – 2.5 ms/cm)
 - pH (5.4 – 6.8)

- Prueba de **variación de la temperatura en una solución con un valor específico de Electroconductividad y pH**. La prueba se la realiza en un rango de temperatura de 10°C hasta 50°C con una solución de valor de EC y pH medida a 25°C.

Las pruebas que se realizan incluyen la medición con un multímetro de valores de voltaje y corriente de diferentes puntos del transmisor. Estos son: circuitos acondicionadores, el centro de recopilación de datos y la etapa de transmisión de datos.

Para cada una de las pruebas, los puntos del transmisor diseñado que se miden son los mismos. Las siguientes Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 ilustran esos puntos.

El circuito de la Figura 4.1 muestra la etapa del amplificador de instrumentación del circuito acondicionador de Electroconductividad señalando los puntos de prueba.

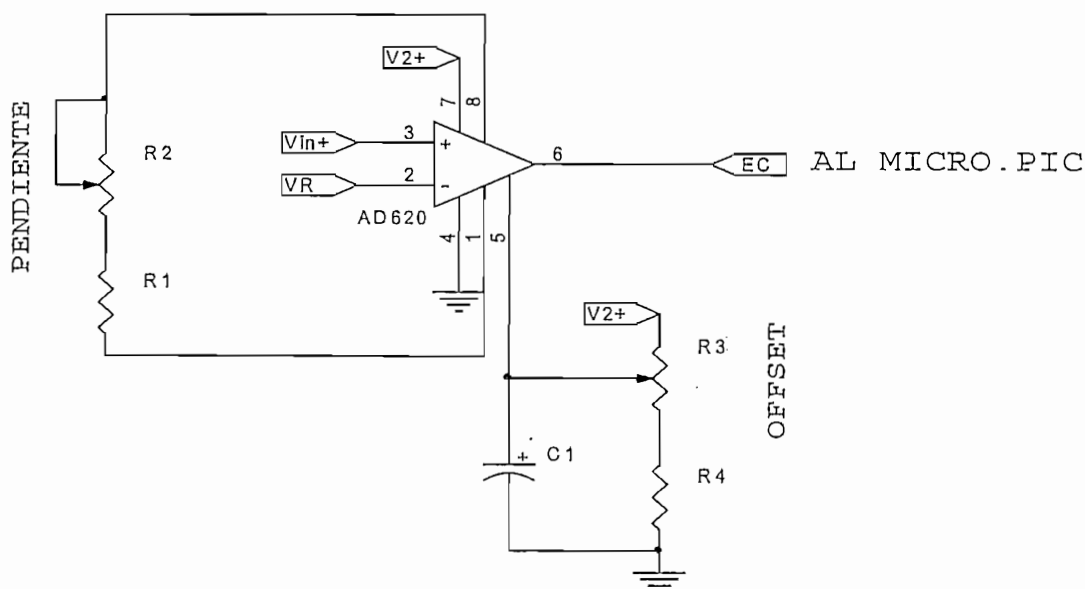


Figura 4.1 Puntos de Prueba del Circuito Acondicionador de EC

$V_{inEC} = V_{in+} - VR =$ Voltaje de entrada al amplificador de instrumentación

$V_{outEC} = EC =$ Voltaje de salida del amplificador de instrumentación

El circuito de la Figura 4.2 muestra la etapa del amplificador de instrumentación del circuito acondicionador de pH señalando los puntos de prueba.

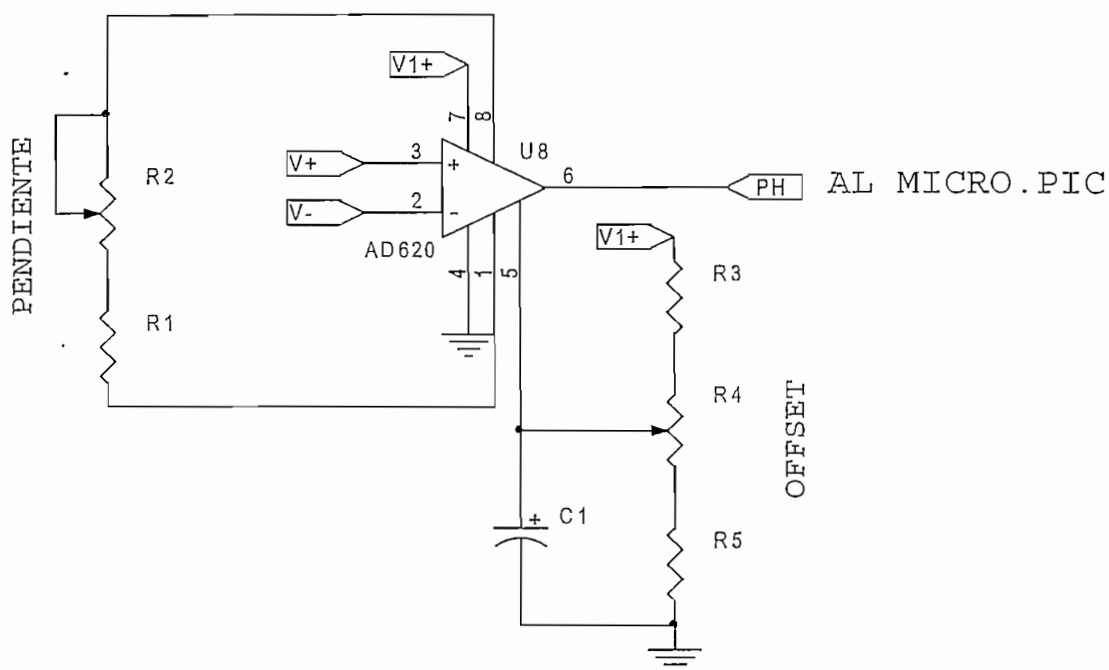


Figura 4.2 Puntos de Prueba del Circuito Acondicionador de pH

$V_{inpH} = V+ - V-$ = Voltaje de entrada al amplificador de instrumentación

$V_{outpH} = PH$ = Voltaje de salida del amplificador de instrumentación

Cabe anotar que los voltajes de salida de los acondicionadores (V_{outEC} y V_{outpH}), son los voltajes de entrada al microcontrolador PIC.

La Figura 4.3 muestra la etapa del amplificador de instrumentación del circuito acondicionador de pH señalando sus puntos de prueba.

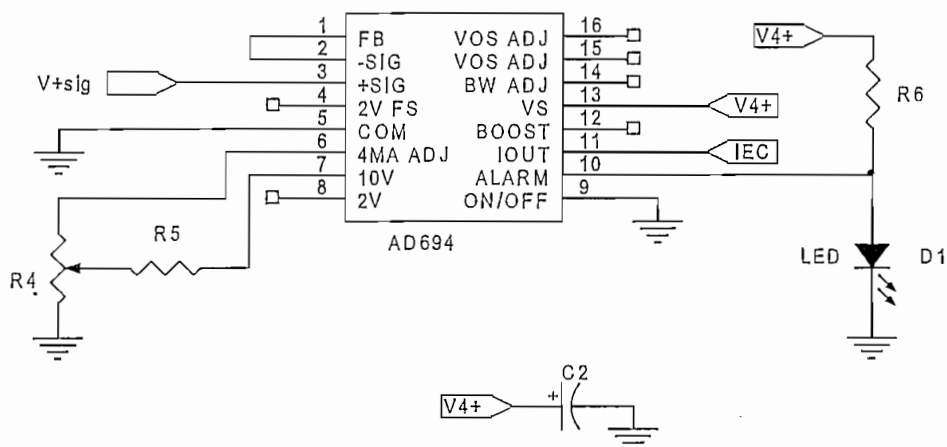


Figura 4.3 Puntos de Prueba del Circuito de transmisión de EC

$I_{outEC} = IEC =$ Corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de EC

La Figura 4.4 muestra la etapa del amplificador de instrumentación del circuito acondicionador de pH señalando sus puntos de prueba.

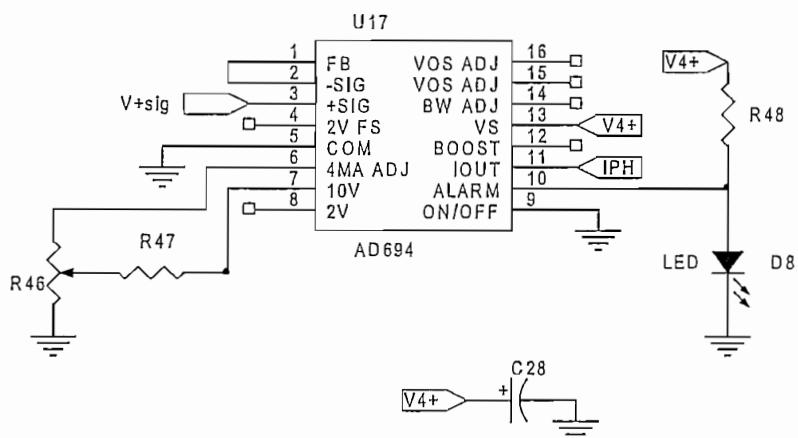


Figura 4.4 Puntos de Prueba del Circuito de transmisión de pH

$I_{outpH} = IPH =$ Corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de pH

Para realizar las pruebas del transmisor de Electroconductividad y pH diseñado, se toma como instrumento patrón un monitor de EC y pH, cuyas características se describen a continuación:

- EC (0-10 ms).
- Precisión: 0.05 a 0.1 ms.
- PH (0-13) 4-20 mA.
- Exactitud 0.05.
- Máxima impedancia de carga 500Ω.
- Opcional puerto serial RS 485, digital estándar.

Para las pruebas de compensación de temperatura de la Electroconductividad, y la variación del pH en función de la temperatura, el termómetro que se utiliza es un multímetro digital MS8200 con una termocupla tipo "K".

Para las pruebas de la transmisión de datos se utiliza como receptor una computadora de riego marca ELDAR SHANY modelo GAL-2000, que tiene una tarjeta de entradas analógicas. La computadora de riego posee salidas de 24 VAC para el control del riego. La distancia entre el transmisor y la computadora de riego es de 20 metros.

4.1 PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD Y pH PARA TODO EL RANGO DE MEDICION

El objetivo de estas pruebas es analizar la respuesta lograda por los circuitos acondicionadores para los tipos de sensores que se utilizan tanto de Electroconductividad y pH, así como también analizar los valores que se visualizan en el módulo LCD y se transmiten hacia la computadora de riego. Estas pruebas se las realiza para todo el rango de medición del transmisor a una temperatura constante.

Antes de proceder con las pruebas, se calibra el instrumento patrón y el instrumento diseñado con sustancias buffer de 1.4 ms/cm y 0.0 ms/cm, esto para la Electroconductividad, y con sustancias buffer de 7.0 y 4.0 para el pH.

4.1.1 PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD

Esta prueba se la realiza con diferentes soluciones preparadas. Primeramente se prepara soluciones con diferentes valores de Electroconductividad utilizando Cloruro de Sodio (NaCl) y agua destilada.

Para medir los niveles de EC de cada una de las muestras se introduce la celda de Electroconductividad conectada al instrumento patrón en las diferentes soluciones de NaCl con agua. Luego con la misma celda, pero ahora conectada al transmisor diseñado y utilizando un multímetro se miden los valores de voltaje y corriente en los diferentes puntos más importantes del transmisor.

En la Tabla 4.1 se presenta los valores de voltajes, corrientes en función de la Electroconductividad en los puntos antes mencionados

EC (ms/cm)	VinEC (mV)	VoutEC (V)	IoutEC (A)	Ecm (ms/cm)
0	7.7	1.27	4.01	0
0	21.8	1.33	4.01	0
0.1	29.2	1.36	4.13	0.1
0.6	64.5	1.53	4.95	0.6
1.2	99	1.69	5.88	1.2
1.7	134.6	1.859	6.7	1.7
2.4	188.6	2.11	7.94	2.5
3.6	268.8	2.484	9.87	3.7
4.5	334	2.791	11.3	4.6

EC (ms/cm)	VinEC (mV)	VoutEC (V)	IoutEC (A)	Ecm (ms/cm)
5.2	381.2	3.012	12.51	5.4
6.1	440	3.3	13.93	6.3
6.8	488	3.527	15.06	7
7.8	558	3.842	16.8	8
8.2	585	4	17.42	8.5
9.1	653	4.3	18.87	9.4
9.3	656	4.35	19.16	9.6

Tabla 4.1 Datos más importantes del transmisor diseñado en función de la EC

- EC** = Valor de Electroconductividad medido con el transmisor patrón.
- VinEC** = Voltaje de entrada al amplificador de instrumentación de EC
- VoutEC** = Voltaje de salida del amplificador de instrumentación de EC y voltaje de entrada al microcontrolador PIC
- ECm** = Valor de Electroconductividad medido con el transmisor diseñado.
- IoutEC** = Corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de EC

Los siguientes Figuras ilustran los datos de la Tabla 4.1.

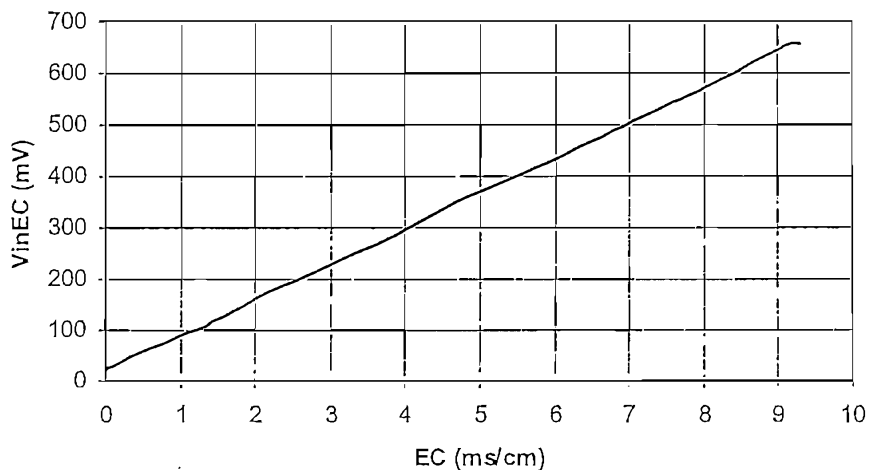


Figura 4.5 Gráfico de la característica del acondicionador de EC en función de la Electroconductividad

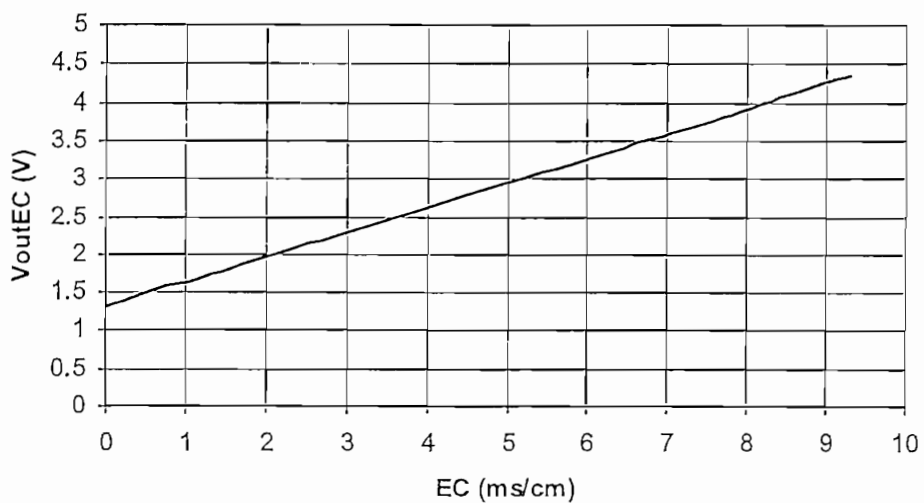


Figura 4.6 Gráfico de la característica del voltaje de entrada al microcontrolador PIC en función de la Electroconductividad

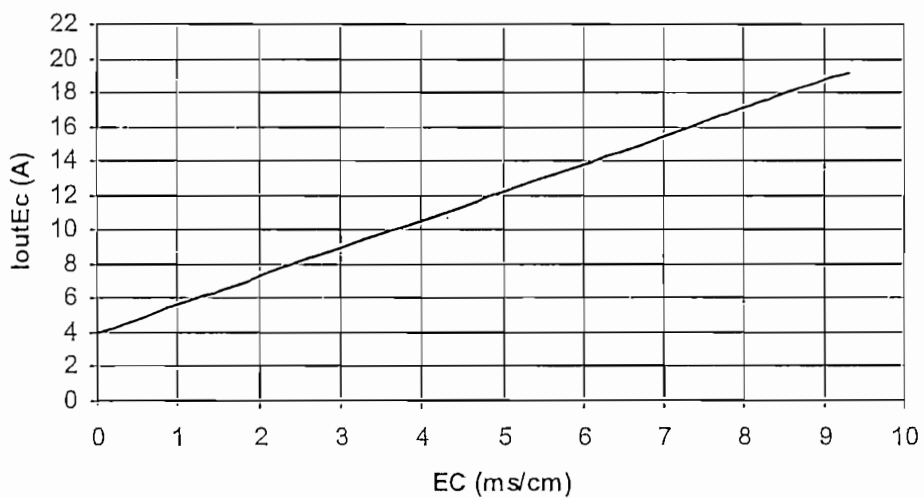


Figura 4.7 Gráfico de la corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de EC en función de la Electroconductividad

Como se observa en la Figura 4.5, la respuesta de la primera etapa del circuito acondicionador de EC planteado es lineal. Las pruebas se las realizó a una temperatura de 18°C.

En la Figura 4.6 se observa que el voltaje a la entrada del microprocesador varía linealmente en función de la Electroconductividad medida por el transmisor patrón. En el Gráfico cabe destacar la calibración del voltaje offset y la pendiente para el acondicionador de EC. Estos voltajes fueron fijados de tal manera de tener valores entre 0V y 5V a la entrada del microprocesador.

En la Figura 4.7 se observa que los valores de corriente que se transmiten varían linealmente en función de la Electroconductividad. Estos valores comprenden el rango de 4-20 mA.

La Tabla 4.2 muestra los errores que se tienen en las mediciones visualizadas en los módulos LCD del transmisor diseñado con respecto al transmisor patrón.

EC (ms/cm)	Ecm (ms/cm)	Error (ms/cm)
0	0	0
0	0	0
0.1	0.1	0
0.6	0.6	0
1.2	1.2	0
1.7	1.7	0
2.4	2.5	0.1
3.6	3.7	0.1
4.5	4.6	0.1
5.2	5.4	0.2
6.1	6.3	0.2

EC (ms/cm)	Ecm (ms/cm)	Error (ms/cm)
6.8	7	0.2
7.8	8	0.2
8.2	8.5	0.3
9.1	9.4	0.3
9.3	9.6	0.3
Error medio		0.125

Tabla 4.2 Errores entre las mediciones visualizadas del transmisor diseñado y el transmisor patrón

Como se observa en la Tabla 4.2 el error medio porcentual para toda la escala es del 1.25%. Este error está dentro del rango permitido para el monitoreo y control del agua de riego en las floriculturas, donde no se necesita que los valores de Electroconductividad sean precisos. Los valores de Electroconductividad del agua de riego pueden tener un error de ± 0.2 ms/cm, el mismo que no afecta la producción de las plantas.

4.1.2 PRUEBAS DE pH

Para esta prueba se prepara soluciones con diferentes valores de pH utilizando vinagre ($\text{pH} \cong 3$), sosa cáustica ($\text{pH} \cong 13$) y agua destilada.

Para medir los niveles de pH de cada una de las muestras preparadas, se introduce el electrodo de pH conectado al transmisor patrón en cada una de las soluciones. Con los valores de pH de cada una de las muestras, y con el mismo sensor pero ahora conectado al transmisor diseñado, se procede a medir los valores de voltaje y corriente de cada muestra en los puntos más importantes del

transmisor. En la Tabla 4.3 se presenta los valores de voltajes, corrientes en función del pH en los puntos antes mencionados.

pH	VinpH (mV)	VoutpH (V)	IoutpH (A)	pHm
2.3	-230.6	0.937	7	2.5
2.6	-212.5	1.035	7.3	2.8
3.8	-151.5	1.36	8.6	3.9
4.2	-126.6	1.5	9	4.3
4.8	-94.3	1.67	9.7	4.9
5.8	-41.6	1.97	10.8	5.9
6.6	0.8	2.2	11.8	6.7
7	21.7	2.32	12.3	7.1
7.4	49.1	2.47	12.8	7.6
7.6	59.4	2.5	13.1	7.8
8.9	131	2.92	14.56	9.1
10.5	223	3.4	16.5	10.8
10.6	230.5	3.473	16.64	10.9
11.9	296.5	3.83	18.1	12.2
12.5	334.4	4.04	18.9	12.9

Tabla 4.3 Datos más importantes del transmisor diseñado en función del pH

- pH** = Valor de pH medido con el transmisor patrón.
- VinpH** = Voltaje de entrada al amplificador de instrumentación de pH
- VoutpH** = Voltaje de salida del amplificador de instrumentación de pH y voltaje de entrada al microcontrolador PIC
- pHm** = Valor de pH medido con el transmisor diseñado.
- IoutpH** = Corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de pH

Los siguientes gráficos ilustran los valores de la Tabla 4.3.

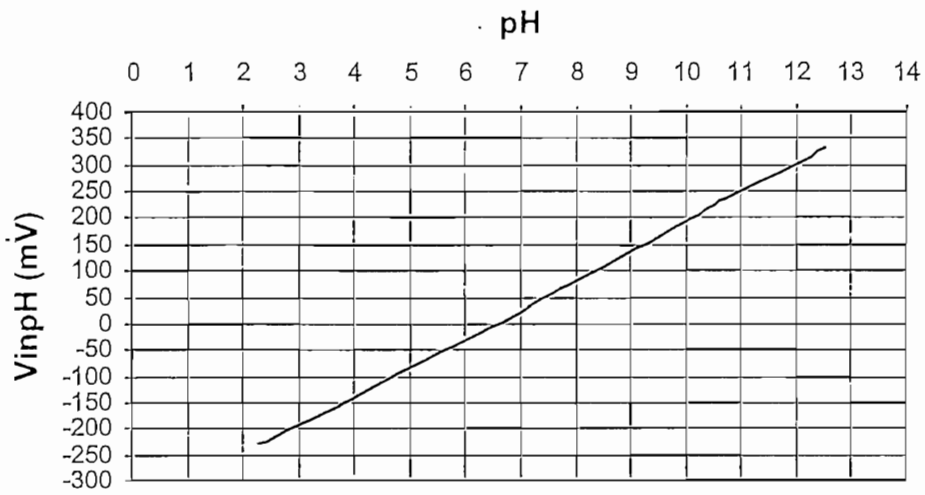


Figura 4.8 Gráfico de la característica del acondicionador de pH en función del pH

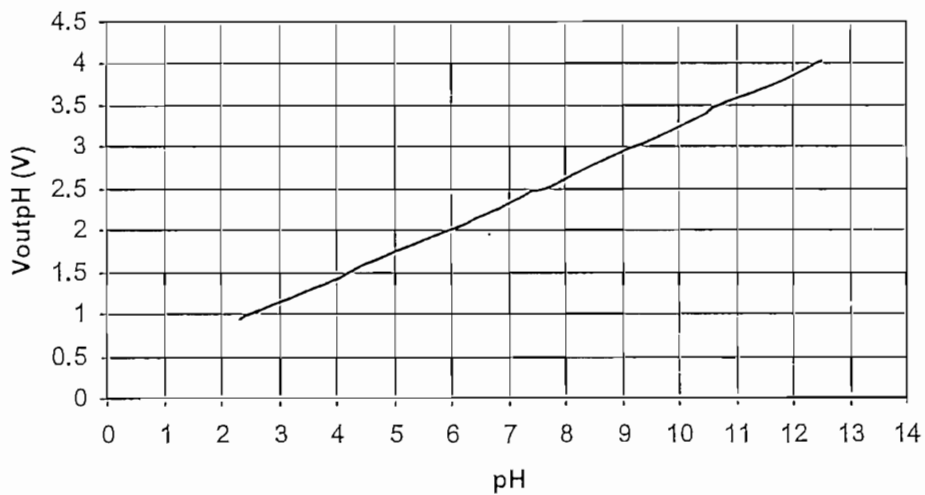


Figura 4.9 Gráfico de la característica del voltaje de entrada al microcontrolador PIC en función del pH

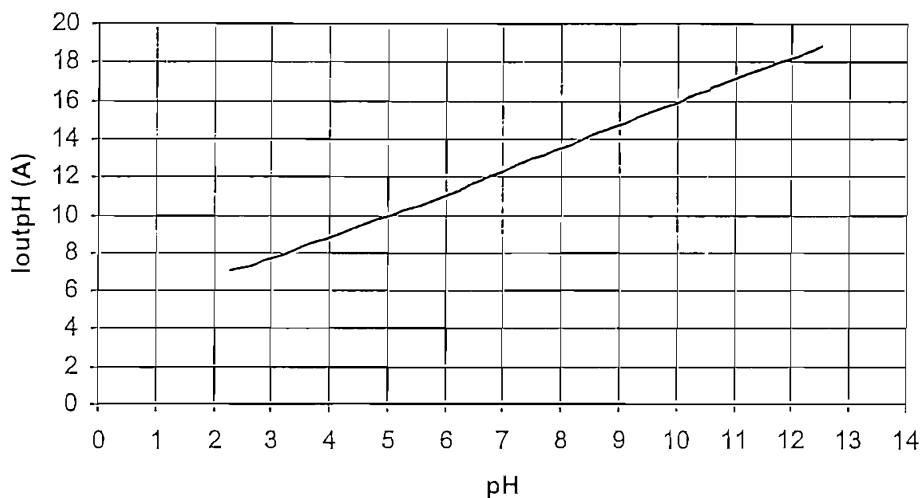


Figura 4.10 Gráfico de la corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de pH en función del pH

En la Figura 4.8 se observa la respuesta del electrodo de pH en función del pH medido con el transmisor patrón. Se observa que mientras la solución es más ácida, el voltaje es más negativo; y si la solución es más básica, el voltaje del electrodo es más positivo. Para una solución de pH neutro el voltaje tiende a 0V. La respuesta de la primera etapa del circuito acondicionador de pH es lineal.

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la variación lineal del voltaje de entrada al microcontrolador y la corriente que se transmite a la computadora de riego en función del pH medido con el transmisor patrón.

La Tabla 4.4 muestra los errores que se tienen en las mediciones visualizadas en los módulos LCD del transmisor diseñado con respecto al transmisor patrón.

pH	pHm	Error
2.3	2.5	0.2
2.6	2.8	0.2
3.8	3.9	0.1
4.2	4.3	0.1
4.8	4.9	0.1
5.8	5.9	0.1
6.6	6.7	0.1
7	7.1	0.1
7.4	7.6	0.2
7.6	7.8	0.2
8.9	9.1	0.2
10.5	10.8	0.3
10.6	10.9	0.3
11.9	12.2	0.3
12.5	12.9	0.4
Error medio		0.18125

Tabla 4.4 Errores entre las mediciones visualizadas del transmisor diseñado y el transmisor patrón.

De los datos de la Tabla 4.4 el error medio porcentual para toda la escala de pH es del 1.29071%. Para el rango de aplicación en una floricultura que es de 5.4 a 6.8 unidades de pH, se tiene un error de 0.1 unidades de pH. Los valores de pH en el agua de riego en las floriculturas, pueden tener un error de ± 0.2 unidades de pH, por lo tanto el error del transmisor diseñado para el rango de aplicación está dentro de lo permitido.

4.2 PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD Y pH PARA UN RANGO DE APLICACIÓN EN UNA FLORICULTURA

Es el objetivo de estas pruebas analizar y comparar el comportamiento del transmisor diseñado con respecto al transmisor patrón en un rango específico.

Para estas pruebas se realiza el mismo procedimiento que las pruebas anteriores. Los rangos de trabajo se han establecido de acuerdo a los valores óptimos de EC y pH para el riego de algunas especies de plantas. Estos rangos son los siguientes:

- EC (1.5 ms/cm – 2.5 ms/cm)
- pH (5.4 – 6.8)

4.2.1 PRUEBAS DE ELECTROCONDUCTIVIDAD

Luego de preparar las soluciones para la prueba en el rango antes mencionado, se procede a medir los valores de voltaje y corriente en los puntos ya establecidos. La Tabla 4.5 muestra los resultados de estas pruebas. Esta prueba se la realiza a una temperatura de 18°C.

EC (ms/cm)	VinEC (mV)	VoutEC (V)	IoutEC (A)	Ecm (ms/cm)
1.5	124.1	1.8	6.36	1.5
1.6	130.1	1.83	6.53	1.6
1.7	134.5	1.85	6.7	1.7
1.8	143.2	1.89	6.8	1.8
1.9	150.1	1.93	7	1.9
2	157.8	1.96	7.12	2
2.1	162.1	1.99	7.3	2.1

EC (ms/cm)	VinEC (mV)	VoutEC (V)	IoutEC (A)	Ecm (ms/cm)
2.2	168.5	2.01	7.5	2.2
2.3	186.9	2.1	7.8	2.4
2.4	190.1	2.11	7.94	2.5
2.5	197.6	2.15	8.1	2.6

Tabla 4.5 Pruebas de EC del transmisor diseñado en un rango de 1.5ms/cm-2.5ms/cm

- EC** = Valor de Electroconductividad medido con el transmisor patrón.
- VinEC** = Voltaje de entrada al amplificador de instrumentación de EC
- VoutEC** = Voltaje de salida del amplificador de instrumentación de EC y voltaje de entrada al microcontrolador PIC
- ECm** = Valor de Electroconductividad medido con el transmisor diseñado.
- IoutEC** = Corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de EC

Los siguientes gráficos ilustran los resultantes de esta prueba.

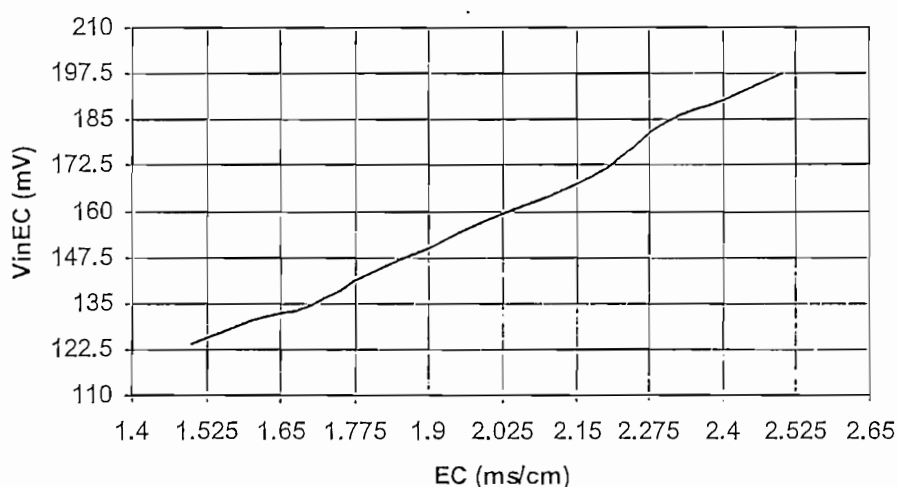


Figura 4.11 Gráfico de la característica del acondicionador de EC en función de la Electroconductividad

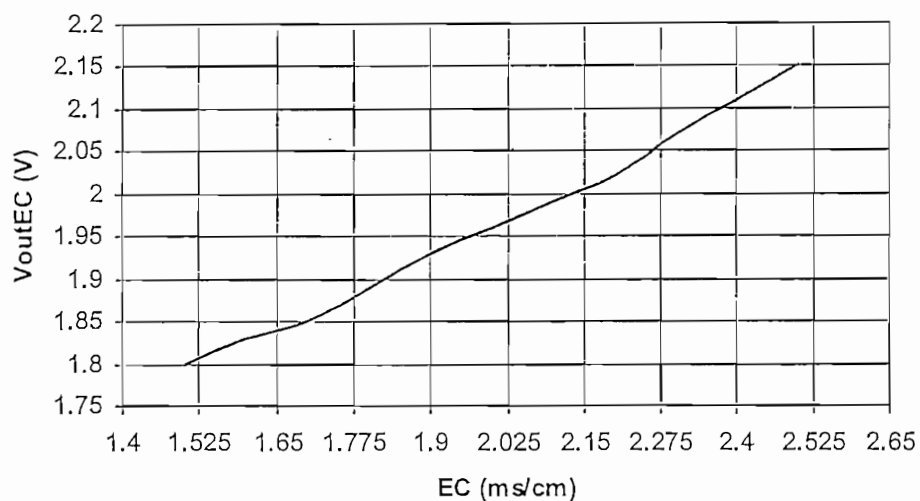


Figura 4.12 Gráfico de la característica del voltaje de entrada al microcontrolador PIC en función de la Electroconductividad

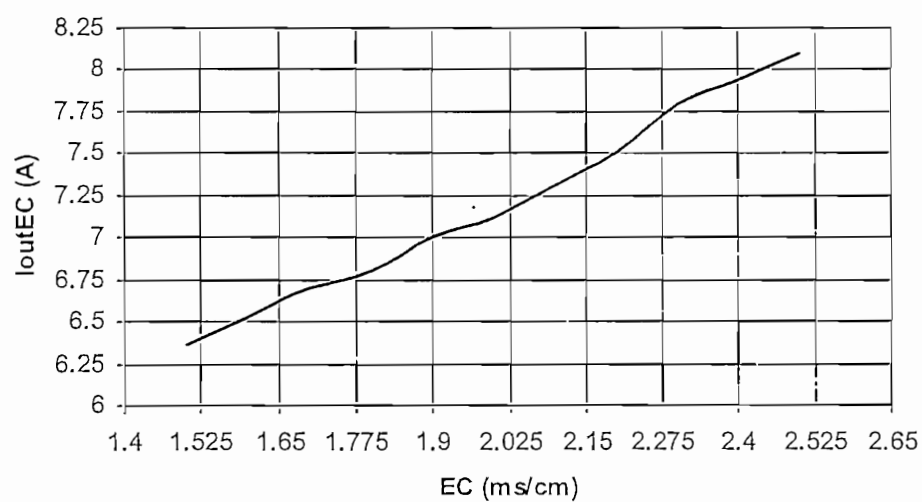


Figura 4.13 Gráfico de la corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de EC en función de la Electroconductividad

Las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 muestran que para el rango de prueba la respuesta del transmisor diseñado varía linealmente en función de la EC del transmisor patrón. Entonces se tiene que para un rango pequeño de pruebas, el comportamiento del transmisor diseñado es igual que para todo el rango.

La Tabla 4.6 muestra los errores que se tienen en las mediciones visualizadas en los módulos LCD del transmisor diseñado con respecto al transmisor patrón para este rango específico.

EC (ms/cm)	Ecm (ms/cm)	Error (ms/cm)
1.5	1.5	0
1.6	1.6	0
1.7	1.7	0
1.8	1.8	0
1.9	1.9	0
2	2	0
2.1	2.1	0
2.2	2.2	0
2.3	2.4	0.1
2.4	2.5	0.1
2.5	2.6	0.1
Error medio		0.03

Tabla 4.6 Errores entre las mediciones visualizadas del transmisor diseñado y el transmisor patrón para un rango específico de medición.

Como se observa en la Tabla 4.6 el error medio porcentual para toda la escala es del 3%, siendo este un error aceptable para el rango de trabajo. El porcentaje de error para toda la escala es del 1.25%. El incremento de error para esta prueba se debe a la inestabilidad de las muestras y debido a que la precisión del instrumento diseñado es de un decimal.

4.2.2 PRUEBAS DE pH

La Tabla 4.7 muestra los resultados de esta prueba

PH	VinpH (mV)	VoutpH (V)	IoutpH (A)	PHm
5	-89.2	1.71	10	5.1
5.4	-71.7	1.8	10.37	5.4
5.6	-57.2	1.889	10.69	5.7
5.8	-49.2	1.93	10.85	5.8
6	-37.6	1.997	11.03	6
6.2	-25.3	2.07	11.3	6.3
6.4	-17.7	2.106	11.5	6.4
6.6	-6.8	2.168	11.7	6.6
6.8	9.5	2.25	12	6.9
7	20.7	2.31	12.3	7.1

Tabla 4.7 Datos más importantes del transmisor diseñado en función del pH

Los siguientes gráficos ilustran los resultados de la Tabla 4.7.

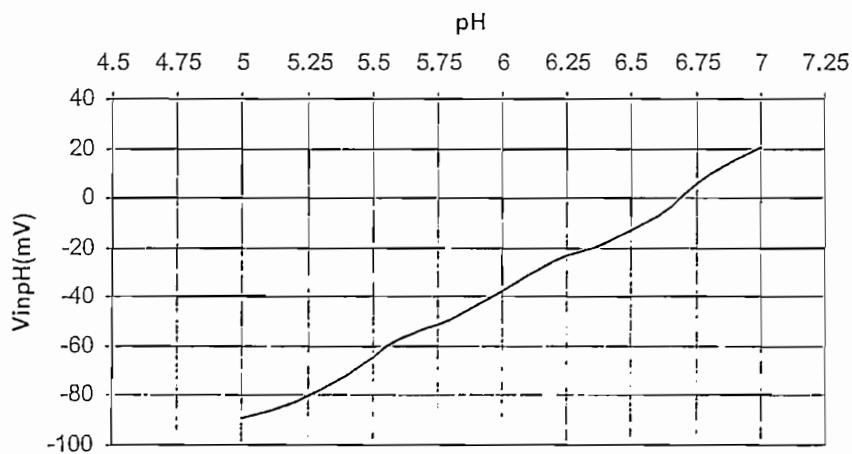


Figura 4.14 Gráfico de la característica del acondicionador de pH en función del pH

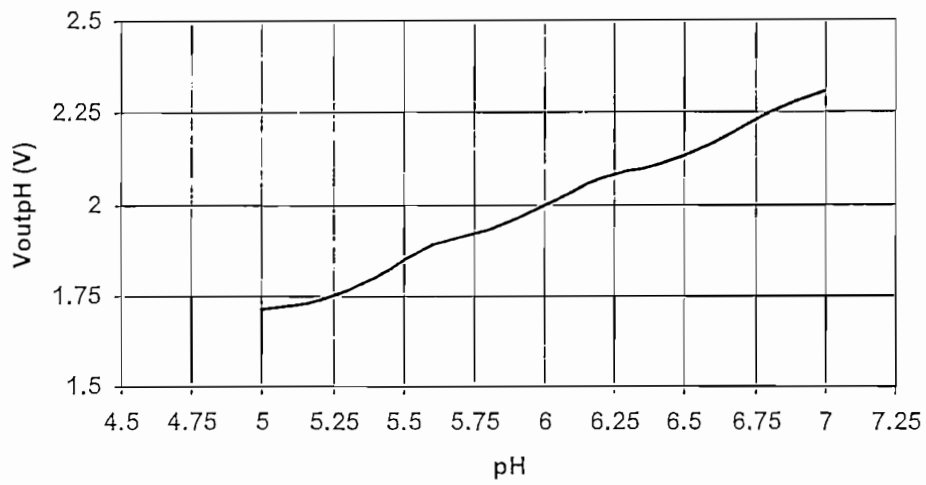


Figura 4.15 Gráfico de la característica del voltaje de entrada al microcontrolador PIC en función del pH

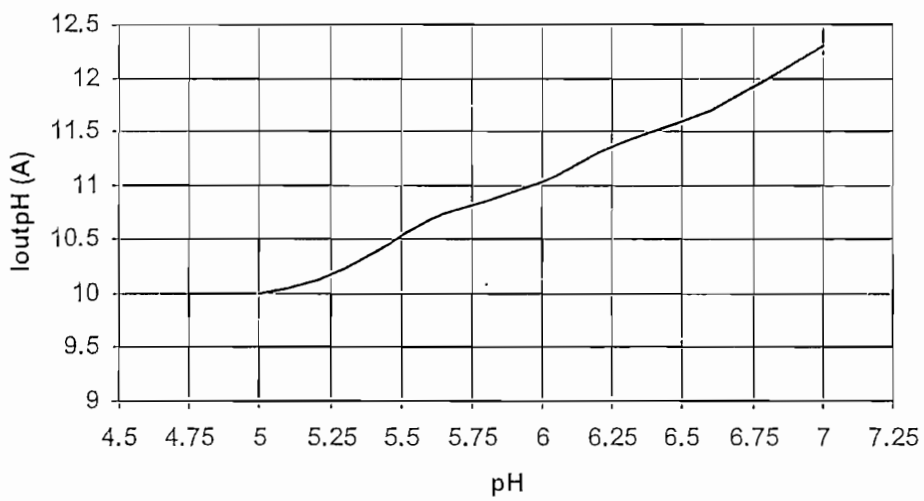


Figura 4.16 Gráfico de la corriente de salida del transmisor correspondiente a un valor de pH en función del pH

En las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se observa la respuesta lineal del acondicionador y del circuito de transmisión de pH. Con esta prueba se ha verificado la respuesta lineal del transmisor para un rango pequeño de medición.

La Tabla 4.8 muestra los errores que se tienen en las mediciones visualizadas en los módulos LCD del transmisor diseñado con respecto al transmisor patrón.

pH	pHm	Error
5	5.1	0.1
5.2	5.2	0
5.4	5.4	0
5.6	5.7	0.1
5.8	5.8	0
6	6	0
6.2	6.3	0.1
6.4	6.4	0
6.6	6.6	0
6.8	6.9	0.1
7	7.1	0.1
Error medio		0.05

Tabla 4.8 Errores entre las mediciones visualizadas del transmisor diseñado y el transmisor patrón

De los datos de la Tabla 4.8 el error medio porcentual para el rango medido es el 2.5%. Para este rango se tiene un error máximo de 0.1 unidades de pH, siendo el mismo un error aceptable como ya se mencionó anteriormente.

4.3 PRUEBAS DE VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA SOLUCION

El primer objetivo de esta última prueba es analizar el comportamiento de la compensación automática de la Temperatura para la Electroconductividad de una solución. El segundo objetivo es analizar la respuesta del pH ante una variación de temperatura en la solución. El rango de variación de la temperatura es de 10 °C a 50°C.

Para realizar esta prueba, se prepara una solución con un valor de EC = 2 ms/cm, y pH=8 a una temperatura de 18 °C (temperatura de la solución).

La prueba se la realiza introduciendo la solución en un recipiente de vidrio, en cuyo interior se encuentran los sensores de Electroconductividad y pH, así como la termocupla utilizada para medir la temperatura. El recipiente de vidrio se introduce en agua a una temperatura de 60°C. Cuando la temperatura de la solución llega 50°C, se toman datos de la Electroconductividad, pH y la temperatura de la solución. A medida que la temperatura de la solución disminuye, se realizan las lecturas. Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 4.9.

TEMP. (°C)	ECm (ms/cm)	pHm
50	1.9	7.9
48	1.9	7.9
46	1.9	7.9
44	2	8
42	2	8
40	2	8
38	2	8
36	2	8

TEMP. (°C)	ECm (ms/cm)	PHm
34	2	8
32	2	8
30	2	8
28	2	8
26	2	8
24	2	8
22	2	8
20	2	8
18	2	8
16	2	8
14	2	8
12	2	8
10	2	8

Tabla 4.9 Resultados de la prueba de variación de la Temperatura de la solución

TEMP. = Temperatura de la solución.

ECm = Valor de Electroconductividad medido con el transmisor diseñado.

pHm = Valor de pH medido con el transmisor diseñado

Como se observa en los resultados de la Tabla 4.9, al variar la temperatura de la solución, el valor de la Electroconductividad se mantiene constante salvo en los primeras mediciones, donde la EC disminuye a 1.9 ms/cm. Esto se debe a que se incrementa bruscamente la temperatura en la solución y al tiempo de respuesta del sensor de temperatura de la celda de EC, luego la Electroconductividad se estabiliza en 2 ms/cm manteniéndose este valor hasta

una temperatura de 10°C. La variación de 0.1 ms/cm a una temperatura superior a 45°C, no afecta la producción de las plantaciones en los invernaderos.

Como se observa en los datos de la Tabla 4.9, existe una variación de 0.1 unidades de pH a una temperatura superior a 45°C, siendo esta mínima y aceptable, es por ello que en el transmisor diseñado no se realiza la compensación de temperatura para esta magnitud.

Para finalizar este Capítulo cabe destacar los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas con el Transmisor de Electroconductividad y pH, donde en cada una de ellas se han obtenido errores que están dentro del rango aceptable para aplicaciones de riego en las floriculturas. Se ha obtenido errores de 0.1 ms/cm y de 0.1 unidades de pH que, como ya se mencionó anteriormente, no afectan el crecimiento y la producción de las plantas. De las pruebas de variación de temperatura se tiene una variación de Electroconductividad y pH a una temperatura elevada (> 50°C), si se toma en cuenta que el agua de riego no alcanza dicha temperatura.

CAPITULO 5



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO 5.

En este Capítulo se tratará de enfocar diferentes puntos acerca del transmisor de Electroconductividad y pH diseñado: sus aplicaciones, análisis de las pruebas y resultados, análisis del costo y recomendaciones.

5.1 CONCLUSIONES

- De las pruebas de Electroconductividad para todo el rango (Tabla 4.1) se puede concluir que el circuito diseñado tiene resultados muy satisfactorios en cuanto a la linealidad. De los datos de la Tabla 4.1 se tiene que por cada 0.1 ms/cm existe una variación de 7 mV en el voltaje del circuito acondicionador. Como se observa en los datos de la Tabla 4.2, el error entre las medidas realizadas con el transmisor patrón y el diseñado aumenta en los valores superiores del rango de medida ($>5\text{ms/cm}$), esto se debe a que para la calibración realizada en el transmisor se utilizó sustancias buffer de 1.4 ms/cm y 0.0 ms / cm. Cabe destacar que en una floricultura el rango de trabajo es de 1.5 ms/m – 2.5 ms/cm, por lo que el error en este rango sería menor.
- De las pruebas de pH para todo el rango (Tabla 4.3) se puede observar que la respuesta del circuito acondicionador diseñado es lineal con respecto a la variación del pH. De los datos de la Tabla 4.3 se tiene que por cada unidad de pH existe una variación de 58mV en el voltaje del circuito acondicionador; la desviación estándar de esta curva es de 1.1 mV/pH respecto a la Ecuación 2.4 ($E = E\text{§} + 0.0591 \text{ PH}$) discutida en el Capítulo 2, donde se tiene una variación de 59.1mV por cada unidad de pH. Los datos de la Tabla 4.4 muestran que entre el rango de 4 y 7 unidades de pH, los errores entre las medidas realizadas con el transmisor patrón y el diseñado son constantes e igual a 0.1 unidades de pH. Esto se debe a que la calibración realizada en el transmisor se realizó con sustancias buffer de 4 y 7 unidades de pH. Por ello que para este rango las medidas aseguran mayor exactitud.

- Para las pruebas de Electroconductividad y pH en un rango de trabajo para una aplicación en una floricultura, se observa que el error para ambos casos se mantiene en un rango tolerable, considerando que la tolerancia de los elementos que se utilizan en el circuito acondicionador es $\pm 5\%$. El error máximo que se tiene es de 0.1 ms/cm para la Electroconductividad y 0.1 unidades de pH para el pH. El error de 0.1 ms/cm y 0.1 unidades de pH no tiene mayor incidencia en el control de riego en una floricultura. Como se mencionó anteriormente el error bajo en estos rangos se debe a que la calibración de los transmisores se las hizo con soluciones buffer cercanas a estos rangos.
- Como se observa en los datos de la Tabla 4.9 del Capítulo 4, la variación de Temperatura en la solución de prueba, no afecta en las mediciones de pH, es por ello que en este proyecto no se contempló la compensación de Temperatura para el pH.
- Para las pruebas de compensación de Temperatura en la Electroconductividad (Tabla 4.9) se observa que al variar la Temperatura de la solución de prueba entre el rango de 50°C a 10°C la Electroconductividad medida por el transmisor diseñado se la hace con respecto a una temperatura de 25°C. Cabe destacar que la compensación automática de Temperatura es aplicable dentro del rango de 10°C a 50°C.
- Para las pruebas de Electroconductividad primeramente se utilizó una mezcla de agua con "SAL DE MESA". El valor máximo de Electroconductividad que se llegó es de 9 ms/cm. Al incrementar la cantidad de SAL en la solución, la Electroconductividad no aumenta, esto se debe a que existe una mayor cantidad de sustancias en la solución que impiden el flujo de electrones. La Electroconductividad podría disminuir si se incrementa la cantidad de SAL en la solución.

- En cuanto a los tiempos de estabilización. El sensor de EC tiene un tiempo de estabilización de aproximadamente 5 segundos, mientras que para el sensor de pH el tiempo de estabilización es de aproximadamente 10 segundos.
- Para las pruebas de transmisión de corriente (4-20 mA) correspondiente a los valores de Electroconductividad y pH se utilizó como elemento receptor una computadora de riego, comprobándose que la corriente que se transmite es directamente proporcional a los valores de Electroconductividad y pH. Esto se lo puede ver en todas las pruebas realizadas, donde los valores de corriente de salida son directamente proporcionales a los valores de Electroconductividad y pH mostrados en el módulo LCD.
- También como elemento receptor se puede utilizar: una computadora (con una tarjeta de entradas analógicas), un PLC, actuadores o electroválvulas. En un proceso donde el computador sea el receptor se pueden tener registros de información acerca de las magnitudes monitoreadas.
- La Tabla 5.1 muestra en detalle la lista de materiales y el costo total del transmisor construido.

TABLA 5.1. LISTA DE MATERIALES Y COSTO DEL TRANSMISOR

DESCRIPCION	CANTIDAD	COSTO (\$)
FUENTES DE VOLTAJE		
TRANSFORMADOR 24V / 15V, 15V, 12V, 10V	1	6.00
Fusible 0.5A	1	0.20
Varistor 50V	1	0.50
Puente Rectificador DB105	4	3.80
Reguladores de voltaje	4	3.52
Condensadores 1000uF / 35V	4	2.08
Condensadores 10uF / 25V	4	0.80

DESCRIPCION	CANTIDAD	COSTO (\$)
FUENTES DE VOLTAJE		
Resistencias ¼ W varios valores	3	0.20
Potenciómetro precisión 5K	1	1.50
SUBTOTAL		19.00
ACONDICIONADOR DE EC		
Amplificador de instrumentación AD620	1	5.00
Circuito integrado LM324	1	2.00
Bornera Regleta 4 Tornillos	1	0.50
Transistores 2N3904	2	0.50
Diodos 1N4148	2	0.50
Potenciómetro de precisión 5K	2	3.00
Condensadores varios valores	11	3.00
Resistencias ¼ W varios valores	14	2.00
SUBTOTAL		16.50
ACONDICIONADOR DE pH		
Amplificador de instrumentación AD620	1	5.00
Circuito integrado CA324	1	1.00
Bornera Regleta 2 Tornillos	1	0.40
Resistencias ¼ W varios valores	8	0.60
Potenciómetros de precisión 2K	2	3.00
Condensadores varios valores	4	1.00
SUBTOTAL		11.00
SISTEMA INTELIGENTE		
Microcontrolador PIC 16F872	1	5.00
Módulo LCD 1X16	1	15.00
Circuito integrado LM358N	1	1.00
Cristal 4 MHz	1	0.50

Pulsadores	5	2.50
DESCRIPCION	CANTIDAD	COSTO (\$)
SISTEMA INTELIGENTE		
Circuitos Integrados LM373	2	1.00
Resistencias ¼ W varios valores	10	1.00
Condensadores varios valores	6	2.00
SUBTOTAL		28.00
SISTEMA DE TRANSMISIÓN		
Circuitos integrados AD694	2	21.00
Circuitos integrados NTE2056	2	9.16
Circuitos integrados LF351	2	2.00
Potenciómetros de precisión 5K	2	3.00
Condensadores varios valores	4	1.00
Bornera Regleta 3 Tornillos	1	0.62
Resistencias ¼ W varios valores	10	1.00
Diodos LED	2	0.50
SUBTOTAL		38.28
OTROS		
Impresos y fotograbado	2	80.00
Estructura (fibra de plástico)	1	40.00
Transformador 110V / 24V	1	10.00
Pasacables y conectores	4	1.92
SUBTOTAL		131.92
TOTAL		244.70

El costo total del Transmisor de Electroconductividad y pH de este proyecto es de \$244.70.

- Por último cabe anotar que para la construcción del transmisor, todos los elementos que se utilizaron resultan sencillos de conseguir en nuestro mercado a un costo tal como lo muestra la Tabla 5.1; por lo que se podría pensar en la producción local de estos transmisores a un precio mucho más conveniente. Distintas marcas de sensores se podrían utilizar en el transmisor diseñado. En los ANEXOS se muestran diferentes marcas y tipos de sensores con sus respectivos precios.

5.2 RECOMENDACIONES

- El proyecto de tesis desarrollado está enfocado a aplicaciones de monitoreo del agua de riego en floriculturas, invernaderos, o plantaciones. Las magnitudes monitoreadas son la Electroconductividad y el pH. En una etapa posterior se recomienda se estudie la posibilidad de implementar en el mismo un sistema de control automático para controlar válvulas que alimenten: soluciones ácidas o básicas para el control de pH, y nutrientes para el control de la Electroconductividad en diferentes procesos.
- El transmisor de EC y pH diseñado puede tener otro tipo de aplicaciones a más de las floriculturas. Se lo puede implementar en procesos de: monitoreo de la calidad de agua en las plantas, acuarios (el agua con un pH muy alto no es buena para los peces y las plantas), aguas residuales en industrias, en laboratorios químicos. Por lo mismo se recomienda explorar estos campos de aplicación.
- Se recomienda que las soluciones buffer que se utilizan para la calibración de la Electroconductividad y pH sean de valores aproximados al rango de trabajo, para que los valores que están dentro del rango sean más exactos.

- Se recomienda que las opciones de calibración: AUTOSETEC y AUTOSETPH se utilicen cuando no se tengan soluciones buffer para la calibración, o cuando las soluciones buffer tengan características pobres.

- Se recomienda corregir o añadir el modelo que aquí se ha producido para lograr su penetración en la agricultura como una solución local. La demanda de este tipo de dispositivos es grande y la EPN debería aprovecharla para lograr patentar una solución propia.

***REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS***

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Beltran Antonio. Técnica del Riego. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Quito - Ecuador. Abril 1979
- [2] Chapman D., Parker F. Pratt. Métodos de Análisis para Suelos, Plantas y Aguas. Editorial Trillos. México. Marzo 1991.
- [3] Cole-Parmer International. Illinois U.S.A. 1996.
- [4] Creus Sole Antonio. Instrumentación Industrial. Marcombo. España 1993.
- [5] Granda Gallardo Wladimir. Tesis de Grado: Control de EC y pH utilizando un Controlador Dedicado. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Quito - Ecuador .2001.
- [6] Harry Norton. Sensores y Analizadores. Prentice – Hall. España 1984.
- [7] Jenkins David. Química del Agua: Manual de Laboratorio. 1983
- [8] Jiménez Juan Francisco. Curso de Programación de Microcontroladores PIC. Quito – Ecuador. 2001.
- [9] Microchip. 2001 Technical Library cd-rom. Primera Edición. U.S.A. 2001.
- [10] Milton Fireman y H. E. Hayward. Agua. Su Aprovechamiento en la Agricultura. Editorial Herrero. México D.F. 1995
- [11] National Semiconductor. General Purpose Linear Devices Databook. National Semiconductor Corporation. U.S.A. 1989.

- [12] National Semiconductor. National Data Acquisition Databook. National Semiconductor Corporation. U.S.A. 1995.
- [13] Newport Databook VI cd-rom. Complete Product Specs & Manuals!. Newport Electronics, Inc. U.S.A. 2001.
- [14] Pedro Raúl Solorzano. Fertilidad de Suelos, Su Manejo en la Producción Agrícola. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Marzo 1997.
- [15] Publicaciones Cekit. Electrónica & Computadores Año 3 N° 12. Ejemplar de Colección N° 36. Pereira - Colombia.
- [16] Soisson Harold E. Instrumentación Industrial. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores. México 1994.
- [17] Theodore L. Brown & H. Eugene Lemoy, Jr. Química la Ciencia Central. Prentice – Hall. 1987.
- [18] Wakerly John F. Diseño Digital Principios y Prácticas. Prentice-Hall. México. 1991.
- [19] William D. Cooper & Albert D. Helfrick. Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. Prentice - Hall. México. 1992
- [20] Yumbra Rojas Patricio. Tesis de Grado: Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico y Software para Sensores de Temperatura de Medio Ambiente. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Quito - Ecuador. Abril 1997.

Direcciones de Internet.

<http://www.hannainst.es>

<http://www.analogdevices.com>

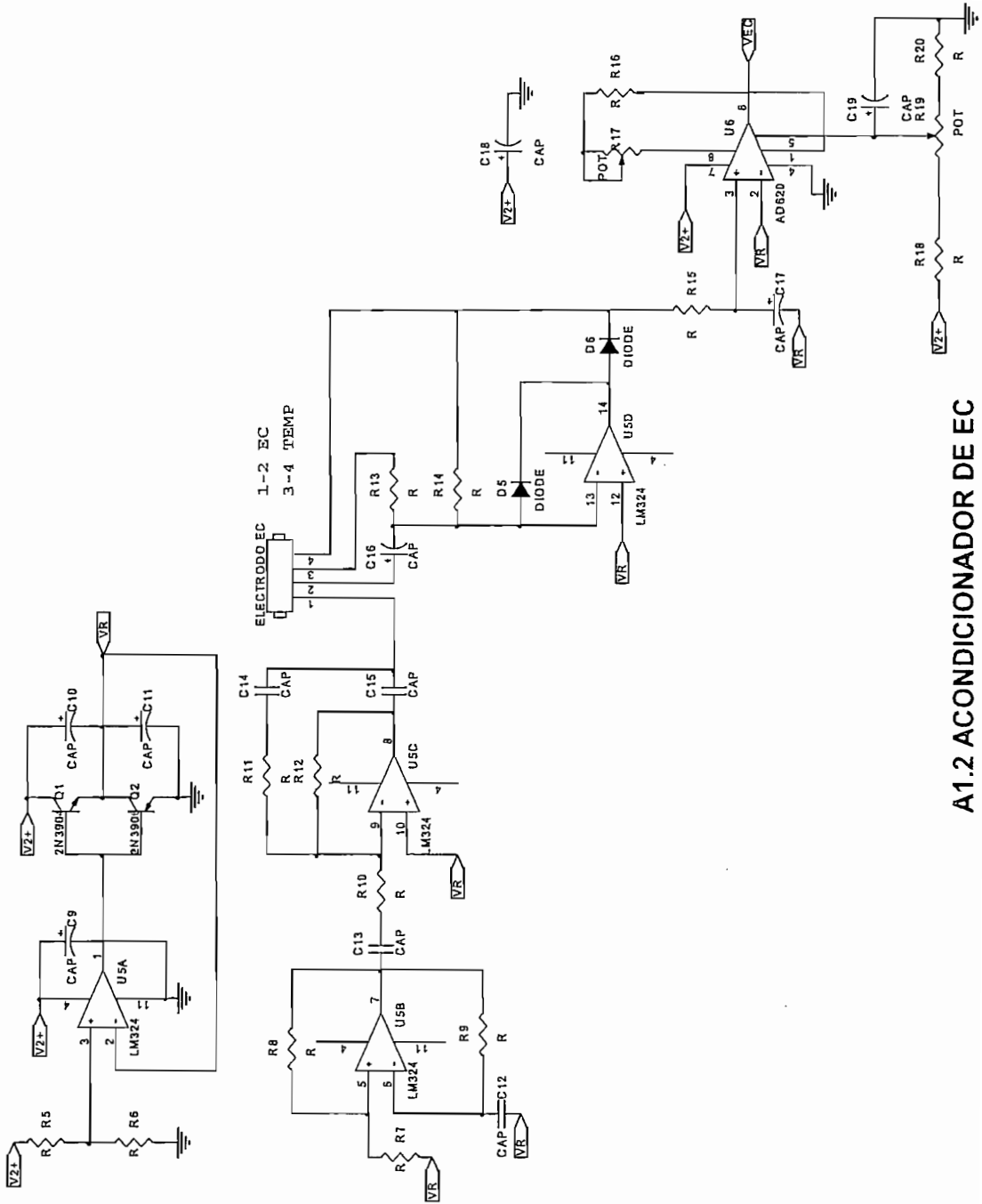
<http://www.microchip.com>

<http://www.cole-parmer.com>

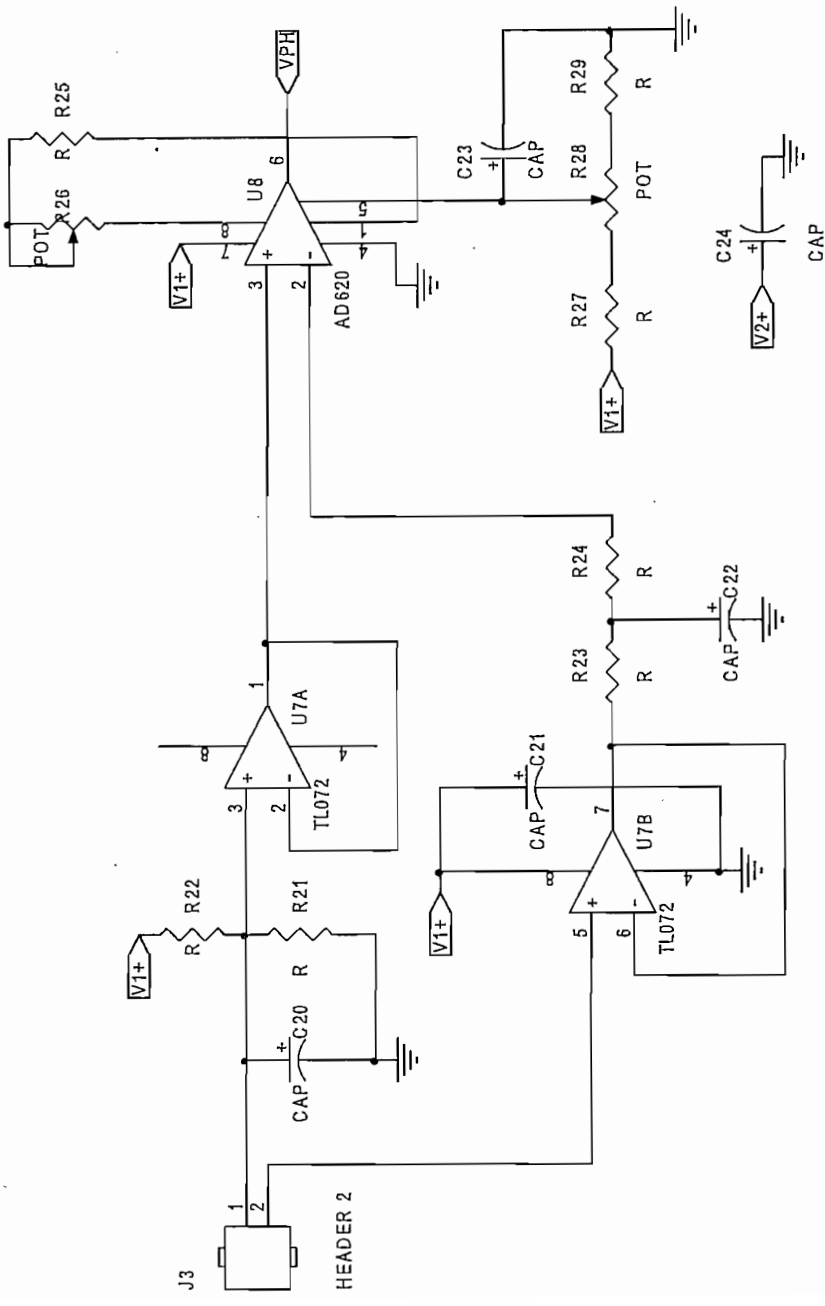
<http://www.omega.com>

<http://www.national.com>

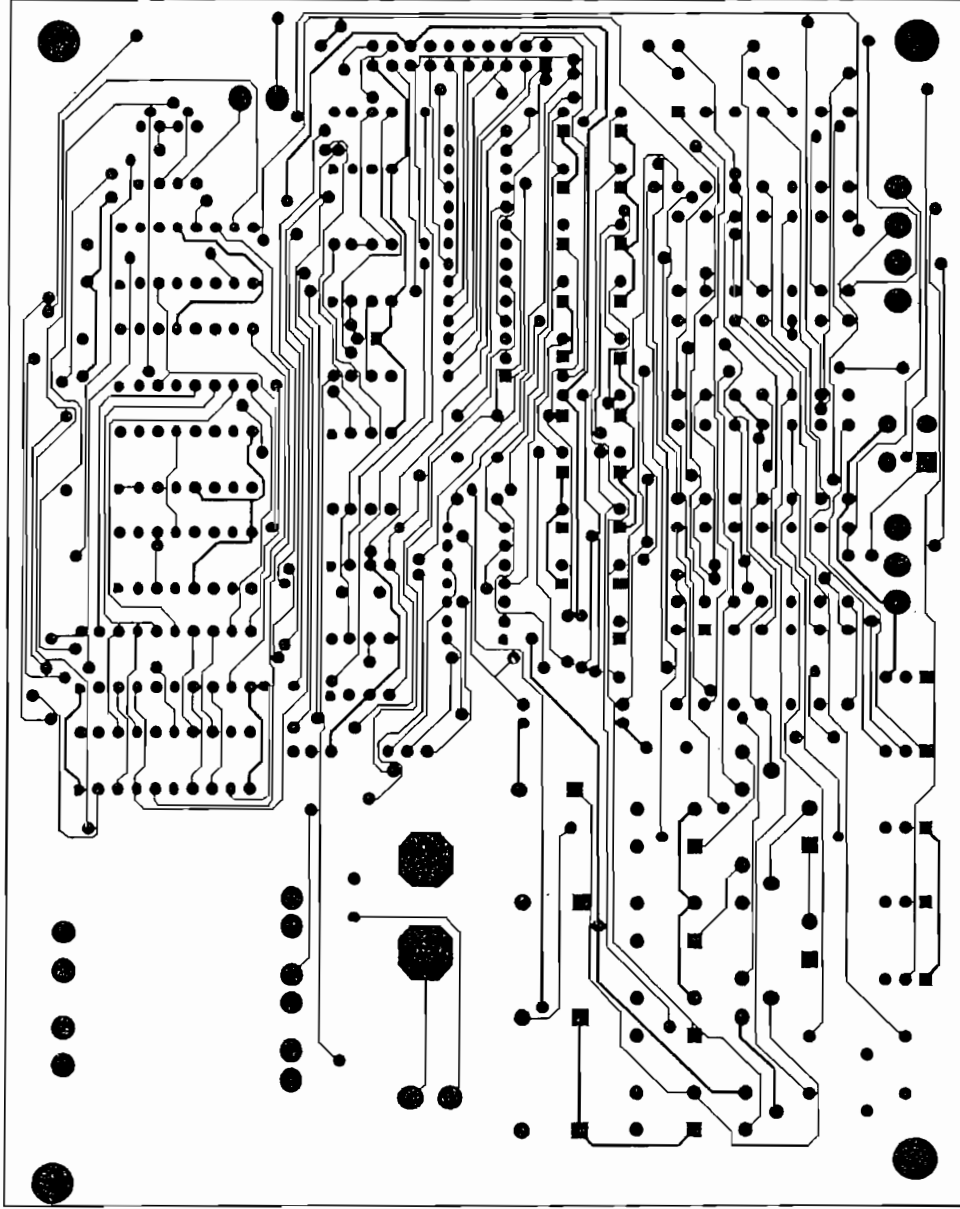
ANEXOS



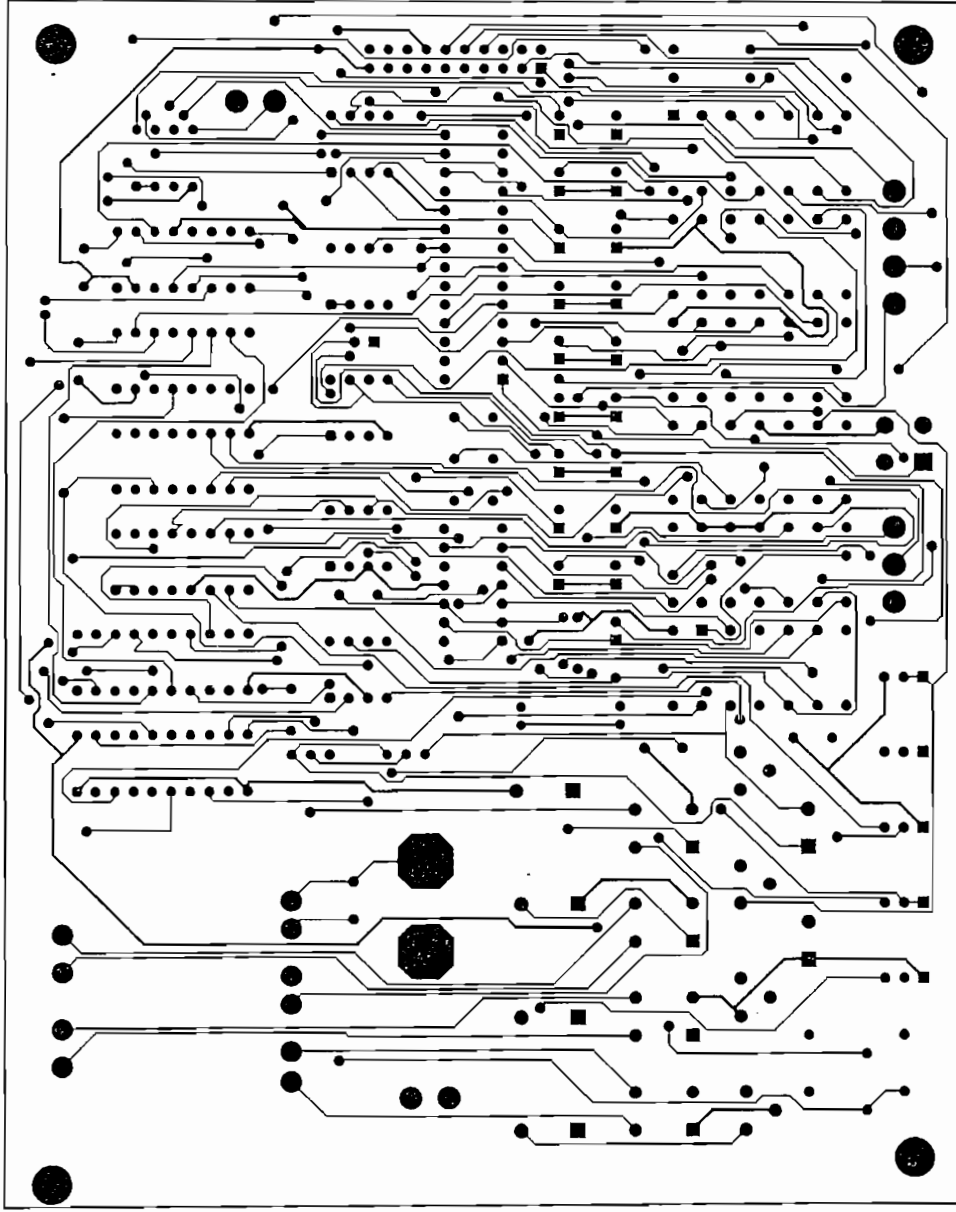
A1.2 ACONDICIONADOR DE EC



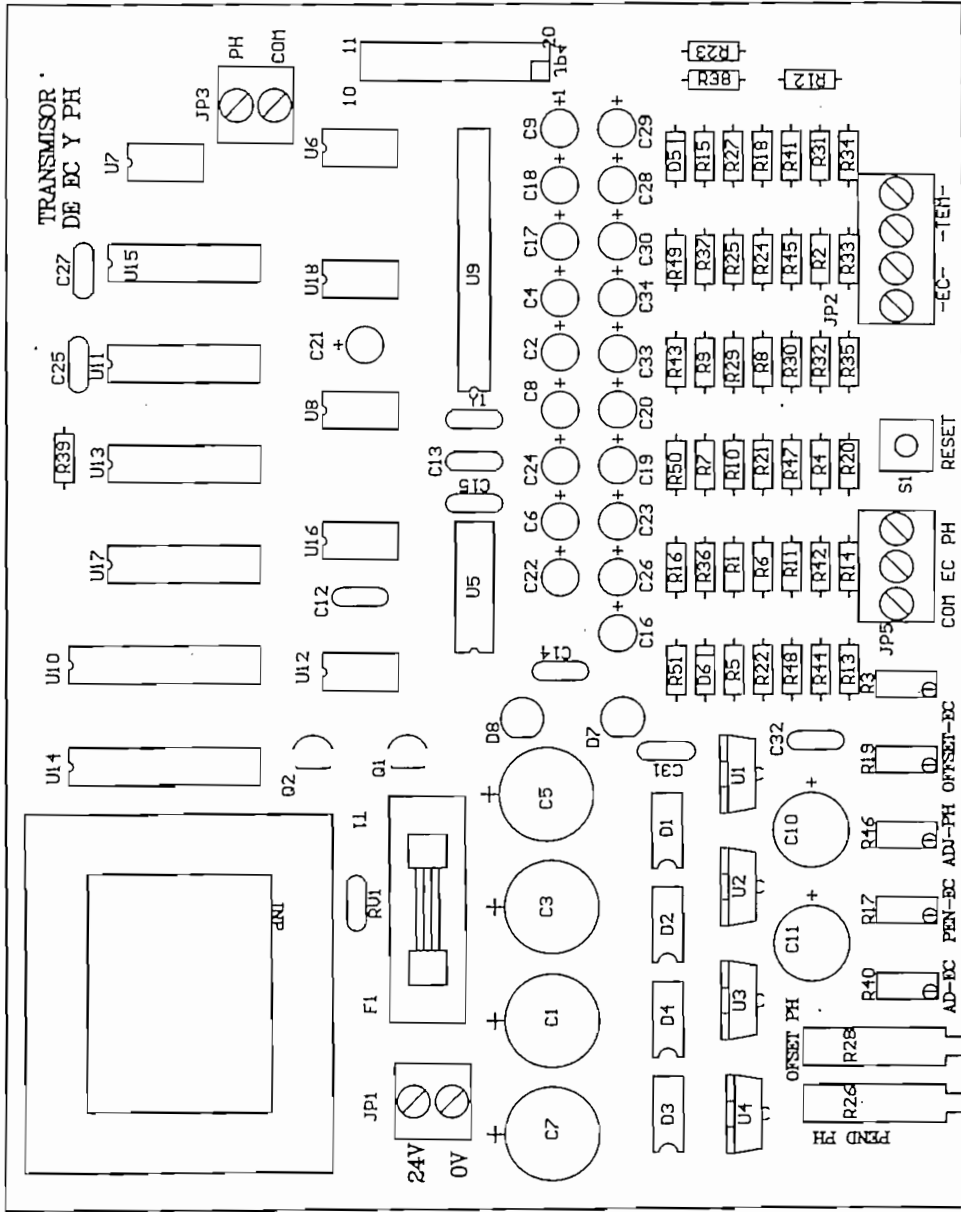
A1.3 ACONDICIONADOR DE pH



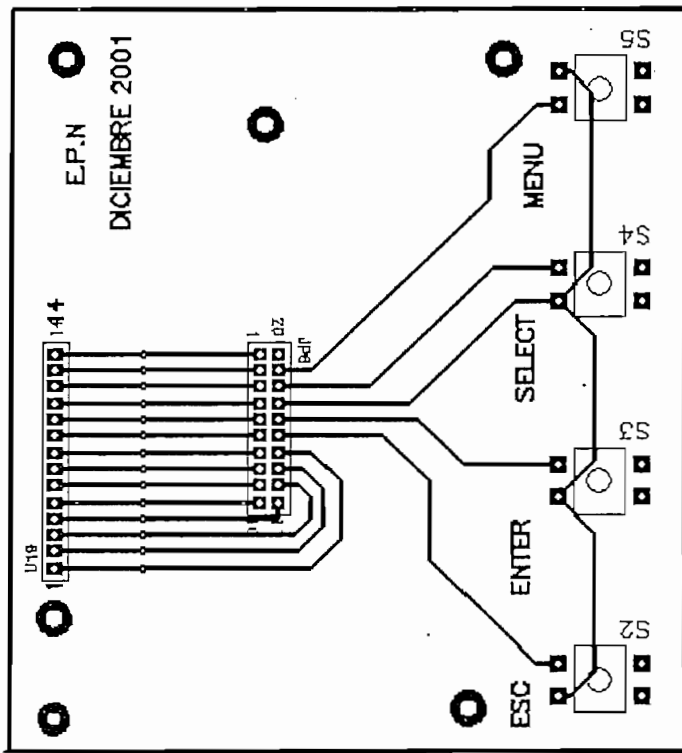
A1.5 CIRCUITO IMPRESO. CARA SUPERIOR DE LA TARJETA PRINCIPAL



A1.6 CIRCUITO IMPRESO. CARA POSTERIOR DE LA TARJETA PRINCIPAL



A1.7 VISTA DE COMPONENTES DE LA TARJETA PRINCIPAL



A1.8 CIRCUITO IMPRESO PARA EL MODULO LCD Y EL TECLADO

**A2.- FOTOGRAFIAS DEL
TRANSMISOR DE EC Y pH**

EC - pH

TRANSMISOR



▶
ENTER

▼
SELECT

MENU

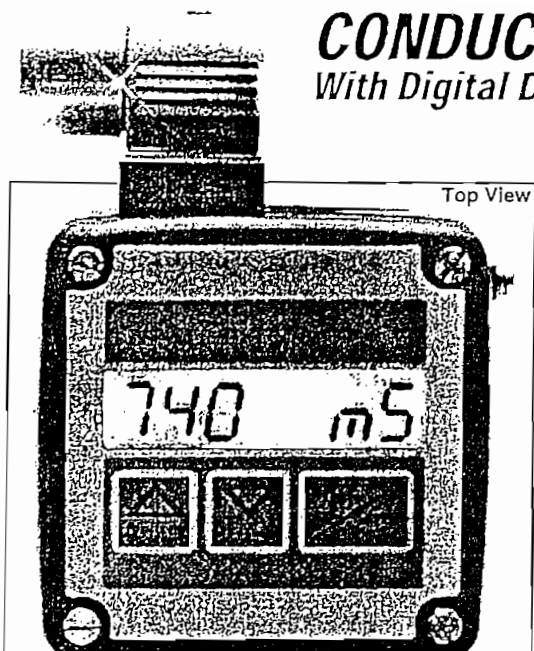
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

JAIME YUMBLA R.

**A3.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
DE SENSORES Y TRANSMISORES
DE EC**

CONDUCTIVITY TRANSMITTERS

With Digital Display



Top View

- ✓ Compact Design
- ✓ Large LCD Display Provides Clear Readability
- ✓ Easy Commissioning Due to Multi-Language, Menu-Guided Operation
- ✓ Individual Adjustment of All Measuring Parameters
- ✓ Freely Programmable, Flexible Measuring Ranges
- ✓ 4 to 20 mA Output Signal and Optional Alarm Relay
- ✓ Installed in Custom Fittings
- ✓ For Use in Both Pipes and Tanks



OMEGA's universal compact conductivity transmitter can be used in solid-free liquids by simply using various types of electrodes. The transmitter produces a 4 to 20 mA standard signal, that is proportional to the conductivity, and provides a freely adjustable alarm output with two relays as an option. The multi-language display and operating elements allow customized adjustment of all measuring parameters. A specially designed fitting system ensures simple and fast installation of the device into pipelines. See the following page for more details.

The conductivity transmitter uses sensors with different cell constants; the 0.01 and 0.1 models are fitted with stainless steel electrodes and those with cell constants 1.0 and 10 are fitted with graphite electrodes. The Pt1000 for automatic temperature compensation is a standard feature with 25°C (77°F) reference temperature.

The conductivity transmitters can easily be installed in pipes using our specially designed fitting system. The minimal size for the conductivity transmitter is 1". When selecting the appropriate fitting, consider the pressure-temperature diagram on the next page and refer to the application ranges of the fitting materials. See also the temperature and pressure limits for analysis transmitters and electrodes; the operating pressure and temperature will be limited by either the installation fitting or the sensor.

SPECIFICATIONS

Pipe Diameter: 1" to 4" in plastic fittings; 1" to 8" in metal fittings
 Ambient Temperature: 0 to 60°C
 Fluid Temperature: 0 to 120°C (depending on installation fitting)
 Storage Temperature: -10 to 80°C (14 to 176°F)
 Fluid Pressure: Maximum 10 bar (145 psi), depending on electrode, temperature, and installation fitting material
 Enclosure: IP65/ NEMA 12
 Measuring Range: 0.05 µS/cm to 200 mS/cm (depending on cell constant)

Accuracy: Typical 3% of measured value (maximum 5% of measured value)
 Supply Voltage: 12 to 30 Vdc (24 Vdc recommended)
 Output Signal: 4 to 20 mA
 Load: Maximum 700 ohm at 30 V
 Display: 15 x 60 mm LCD 8 digits, alphanumeric, 15 segments, character height 9 mm (0.35 in)
 Relay Output (Optional): Freely programmable, 3 A, 230 V
 Sensor Fitting: PVDF
 O-rings: FPM (Viton®), EPDM optional
 Electronic Housing: Polycarbonate
 Front Plate: Polyester
 Fitting: Plastic or Metal (see next page)

TECHNICAL DATA				
Conductivity Electrode				
Cell constant	K=0.01	K=0.1	K=1.0	K=10
Electrode material	PVDF/SS	PVDF/SS	PVDF/Graphite	PVDF/Graphite

To Order (Specify Model Number)		
Model No.	Price	Description
CDTX821	\$852	Conductivity Transmitter, K=0.01, FPM O-rings, no relays
CDTX822	852	Conductivity Transmitter, K=0.1, FPM O-rings, no relays
CDTX823	929	Conductivity Transmitter, K=1.0, FPM O-rings, no relays
CDTX824	929	Conductivity Transmitter, K=10.0, FPM O-rings, no relays

To add 2 relays (3 amp up to 220 Vac), add suffix "-R" to part number and add \$100 to price. To get EPDM O-rings in place of the standard FPM O-rings, add suffix "-EPDM" to the part number; no additional charge. To get PG type conduit connectors instead of the standard 1/4" NPT conduit connectors, add suffix "-PG" to the part number; no additional charge.

Conductivity Transmitters

Series CDTX-90

MADE IN
USA 2 YEAR WARRANTY
Electronics
Only CE

CDTX-90 Series

\$523

Basic Unit

- ✓ Display in μS , mS, kohm, Mohm, ppm (TDS)
- ✓ Simulate Function
- ✓ Programmable Temperature Compensation
- ✓ Relay Options
- ✓ Dual Output Option Allows Temperature and Process Signal Transmission
- ✓ 2 x 16 Character Dot Matrix LCD
- ✓ Chemical Resistant Enclosure and Self-Healing Window
- ✓ Large Pushbuttons
- ✓ Clearly Marked Terminal Labels

Applications

- ✓ RO/DI System Control
- ✓ Rinse Tank Control
- ✓ Cooling Tower, Scrubber or Blowdown Control
- ✓ Environmental Study (TDS)
- ✓ Desalination Monitor
- ✓ Water Quality Monitoring
- ✓ Leak Detection
- ✓ Chemical Concentration

The CDTX-90 Series Conductivity/Resistivity Transmitter is designed for broad application and ease of setup and use. The unit can be used for conductance, resistance, or TDS signal transmission and display. Mounting can be accomplished in several options best tailored to your application requirements. Full microprocessor based electronics allow wide operating range, and long term signal stability due to the elimination of potentiometers, jumpers and dip switches.



Shown Larger Than Actual Size

Specifications

General
 Compatible Electrodes:
 OMEGA® CDCE-90-X Series
 Conductivity/Resistivity Electrodes
 Accuracy: $\pm 2\%$ of reading

Enclosure:
 Rating: NEMA-4X/IP65 front
 Case: PBT
 Window: Polyurethane coated polycarbonate
 Keypad: Sealed 4-Key
 Silicone Rubber
 Weight: Approx. 325 g (12 oz)

Display:
 Alphanumeric: 2 x 16 LCD
 Contrast: User selected, 5 levels

Environmental
 Operating Temperature:
 -10 to 70°C (14 to 158°F)
 Storage Temperature:
 -15 to 80°C (5 to 176°F)
 Relative Humidity:
 0 to 95% non-condensing
 Standards and Approvals:
 CSA, CE, UL listed and
 manufactured under ISO9001

Electrical

Sensor Input Range:
 Conductance: 0.055 to 400,000 μS
 Resistivity: 10 K Ω to 18.2M Ω
 TDS: 0.023 to 200,000 ppm
Temperature:
 PT1000, -25 to 120°C (-13 to 248°F)
 Current Output: 4 to 20 mA, isolated,
 fully adjustable and reversible
 Power: 12 to 24 Vdc $\pm 5\%$ regulated
 Max Loop Impedance:
 50 Ω max @ 12 V,
 325 Ω max @ 18 V,
 600 Ω max @ 24 V
 Update Rate: 0.5 seconds
 Accuracy: ± 0.03 mA @ 25°C, 24 V

Relay Output:
 Mechanical SPDT Contacts:
 Hi, Lo, Pulse, Off

Maximum Voltage Rating:
 5 A @ 30 Vdc, or 5 A
 @ 250 Vac resistive load
Hysteresis: User Adjustable
 Max 400 pulses/min
Open Collector Output:
 Hi, Lo, Pulse, Off
 Open collector, optically isolated,
 50 mA max, sink, 30 Vdc max.
 pull-up voltage. Max 400 pulses/min.

2-Wire Isolated Conductivity Transmitter System



CDTX-45 System

\$1090

Meter and Sensor
(Order Separately)

- ✓ PEEK Sensor Body Construction
- ✓ 4-Electrode Sensor Type
- ✓ Electrode Coating Rejection Diagnostic
- ✓ Universal Mounting Configurations
- ✓ Microprocessor-Based System
- ✓ Large Dual Display Format
- ✓ Loop Powered, Fully Isolated

Sensor Features

The sensor housings are constructed of PEEK, a high performance thermoplastic that provides outstanding mechanical strength and chemical resistance. Multiple sealing materials are used to preserve sensor integrity over a wide range of applications.

The four electrodes used in the cell are made of titanium for greater chemical resistance. Two of these electrodes are used to establish the sensor drive potential. The other two electrodes sense the flow of current between the drive electrodes and maintain the proper drive potential. The current that flows between the two drive electrodes is directly proportional to solution conductivity.

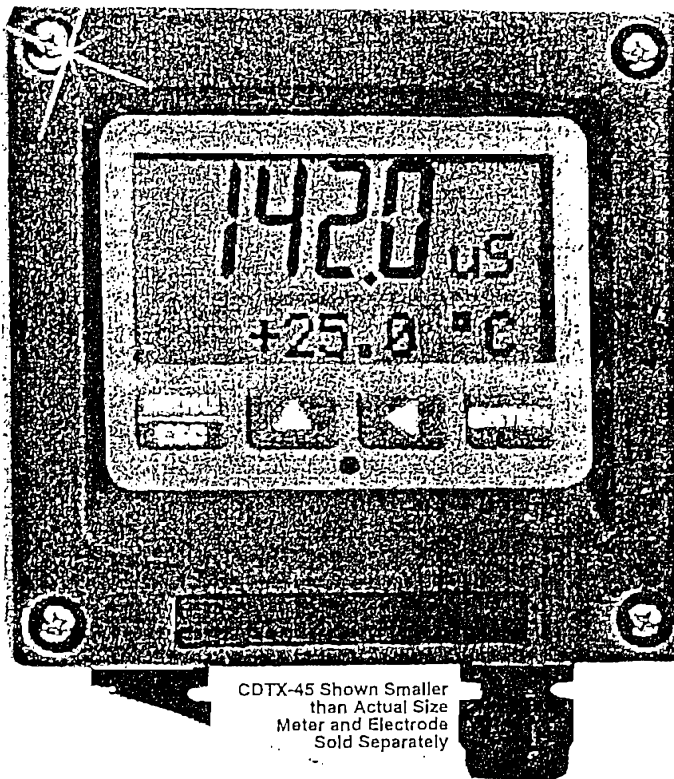
With conventional two-electrode sensors, as the process solution begins to coat the electrode surfaces, the sensor output signal begins to decrease. This produces an artificially low conductivity measurement.

The CDTX-45 four-electrode system uses electrode diagnostics to compensate for the effects of fouling. As the two drive electrodes become coated by the process solution, a feedback mechanism involving the two sensing electrodes detects the decrease in drive potential and automatically re-establishes the proper drive potential. When the degree of coating reaches a limit where compensation is no longer possible, the diagnostic actuates an alarm to signal that the sensor requires cleaning.

The unique drive/control scheme of this system allows a single sensor configuration to be used reliably over a wide conductivity range. This system eliminates the requirement for multiple sensors with varying cell constants that are restricted to narrow operating ranges.

Transmitter Features

The microprocessor-based transmitter is loop-powered and fully isolated for high service reliability. The transmitter includes devices to protect the system from power surge and brownout events.



CDTX-45 Shown Smaller than Actual Size
Meter and Electrode Sold Separately

The large, high contrast, super-twist display provides excellent readability over a wide operating temperature range, even in low light conditions. The main display line consists of large, segmented characters with measurement units. The secondary display line utilizes easily readable dot matrix characters for clear display of calibration and diagnostic messages. Two of four measured parameters may be displayed simultaneously.

CDE-45P Electrode Shown Smaller than Actual Size
Meter and Electrode Sold Separately

MOST POPULAR

To Order (Specify Model Number)

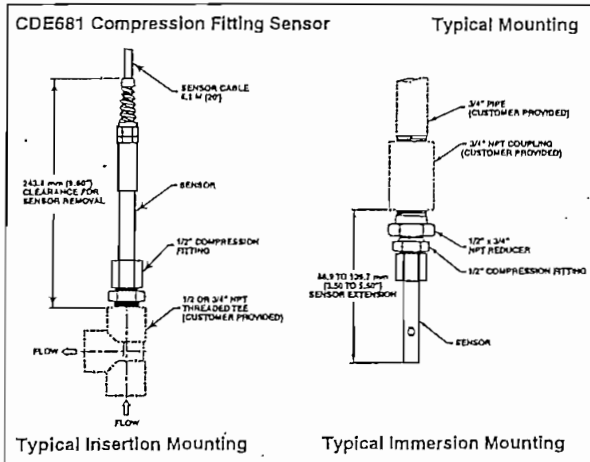
MODELS HIGHLIGHTED!

Model Number	Price	Description
CDTX-45	\$695	Conductivity Transmitter
CDE-45P	395	Conductivity Electrode
U24Y101	128	24 Vdc Power Supply
PHTX-45-SMH	175	Submersion Mounting Hardware, 1.8 m (6')
PHTX-45-FBMH	375	Float Ball Mounting Hardware

Ordering Example: CDTX-45 Conductivity Transmitter, and CDE-45P electrode, \$695 + 395 = \$1090.

Conductivity Sensors Series CDE680

Contacting Conductivity Probes for Use with CDTX680 Series Transmitters and CDCN684, CDCN685 and CDCN686 Series Controllers



Common Specifications

Flow Rate: 0 to 10 ft. (0 to 3 m) per second (fully immersed)

Temperature Compensator: Pt 1000 RTD

Sensor Cable

Integral (No Junction Box):

6-wire cable (4 conductors and two isolated shield wires);

20 ft. (6 m) long

Longer lengths available.

Consult Engineering

CDE681 Compression Fitting

Style Sensor

Purposely designed for ultrapure water and pure water applications, these small, enhanced-performance contacting conductivity sensors provide the required absolute cell (K) constant accuracy, and ultrafast-acting temperature compensation. Materials of construction extend sensor operating life with no degradation in measurement reliability. Wetted Parts—Titanium electrodes, PTFE insulator and treated Viton® O-ring seals

Viton® is a registered trademark of DuPont Dow Elastomers.

— MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

Model Number	Cell Constant	Material	Thread	Temperature/Pressure
CDE681-A-K	\$275	0.05	Kynar (PVDF)	1/2 NPT
CDE681-A-S	350		316SS	
CDE681-B-K	300	0.5	Kynar	3/4 NPT
CDE681-B-S	375		316SS	
CDE681-C-K	300	1.0	Kynar	3/4 NPT
CDE681-C-S	375		316SS	
CDE681-D-K	300	5.0	Kynar	3/4 NPT
CDE681-D-S	375		316SS	
CDE681-E-K	300	10.0	Kynar	3/4 NPT
CDE681-E-S	375		316SS	

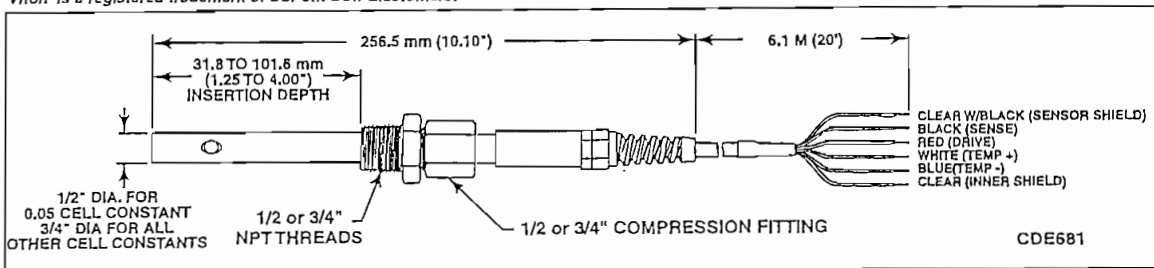
When ordered with Kynar (PVDF) compression fitting:
302°F at 150 psi (150°C at 1.7 bar) or 97°F at 10.3 bar (36°C at 10.3 bar)

When ordered with 316SS compression fitting:
302°F at 200 psi (150°C at 13.7 bar)

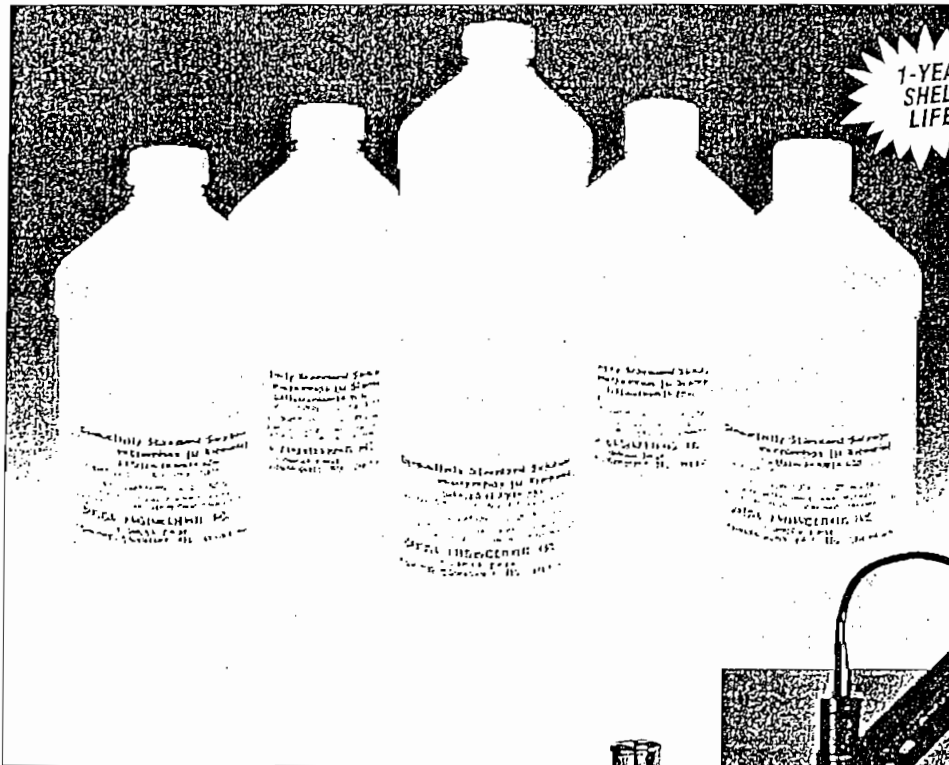
Accessory

Model Number	Price	Description
CDE681-XA-LVFC	\$95	Low volume flow chamber

This 1/2 inch Kynar (PVDF) tee is only used with a 0.05 cell constant sensor. It limits sample volume to approximately 20 ml for high-purity water applications.



CONDUCTIVITY CALIBRATION SOLUTIONS

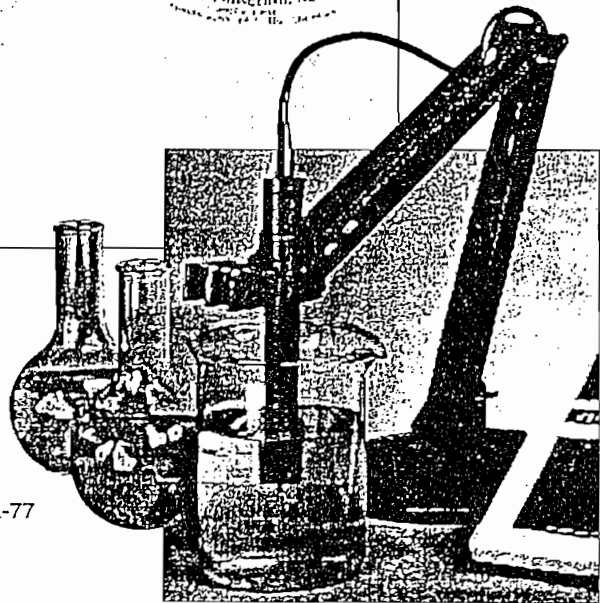


CDS Series
\$10
 per quart

- ✓ Ideal for Calibrating All Conductivity Instruments
- ✓ 4 Popular Ranges Stocked for Quick Delivery
- ✓ NIST Certificate of Conformance Optional

Conductivity standard solutions are used for calibrating a wide range of the conductivity instrumentation shown in this section. To calibrate your instrument, select a conductivity solution which is close to your measuring range and calibrate the instrument for optimal system accuracy.

Standard solutions are available in either 45, 50, 1500 or 4500 $\mu\text{mho/cm}$ ranges. Custom conductivity solutions are available; Contact Applications Engineering.



Third Arm
 Model No. PHA-77
\$35

Model No.	Price	Description
CDS-45	\$10	45 $\mu\text{mho/cm}$ conductivity solution
CDS-450	10	450 $\mu\text{mho/cm}$ conductivity solution
CDS-1500	10	1500 $\mu\text{mho/cm}$ conductivity solution
CDS-4500	10	4500 $\mu\text{mho/cm}$ conductivity solution

Note: Calibration of conformance Certification available at time of purchase. Add suffix "-NIST" to model number and add \$25 to price.
 Ordering Example: CDS-1500, 1500 $\mu\text{mho/cm}$ conductivity solution, \$10.

**A4.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
DE SENSORES Y TRANSMISORES DE
pH**



pH and Conductivity Transmitter with Isolated Output

Model CDTX-300
\$295
Basic Unit

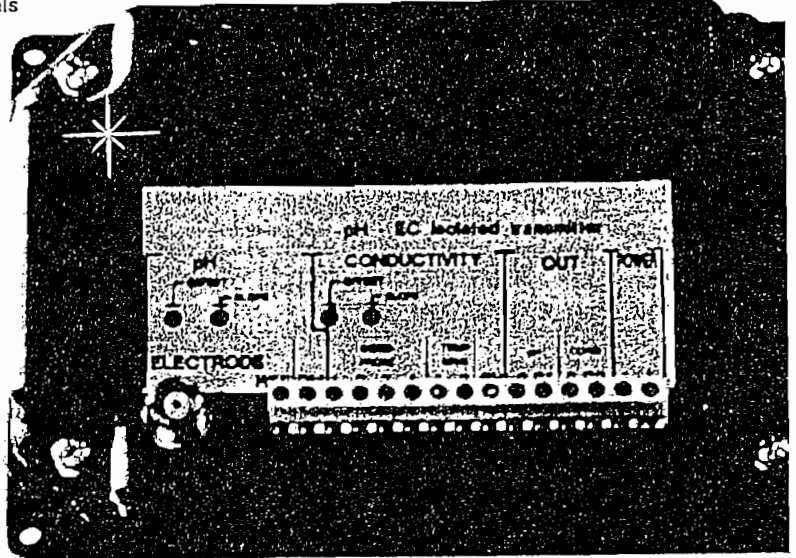
- ✓ CDTX-300 Series is a pH and Conductivity Transmitter Designed to Accept Signals Directly from a pH Electrode and a Conductivity Probe at the Same Time
- ✓ Direct Connection of the Probes to the Transmitter Assures a Positive Electrical Connection with No Signal Loss. This Transmitter is Most Useful in Remote Process Control Applications.

The CDTX-300 two-wire transmitter is widely used for process control in industry today. This instrument is particularly useful in industrial conditions where electrical interference is an important factor. By galvanically isolating the signals, any interference created is prevented from reaching the transmitter. The CDTX-300 uses two wires which reduces costs and eliminates the need for expensive coaxial cable. Two-wire transmitters are ideal when used in remote applications that do not have AC power available.

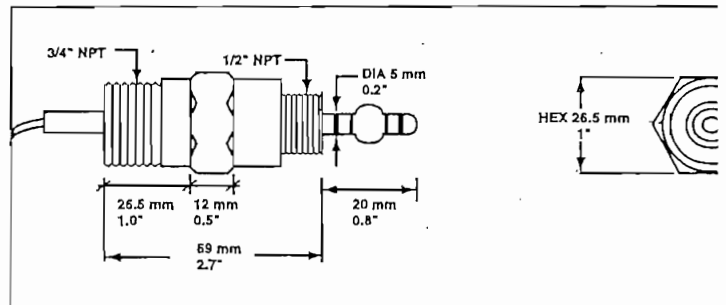
The CDTX-300 series conductivity transmitter uses top-of-the-line, 4-Ring Potentiometric probes. As opposed to the more widely used 2-Ring Amperometric method, the 4-Ring Potentiometric method provides the highest accuracy and repeatability attainable. When measuring liquids that have a high conductivity, the 2-Ring system is susceptible to polarization. 4-Ring electrodes eliminate the polarization effect by splitting the four rings into 2 current electrodes and 2 voltage electrodes. When placed in a conductive liquid, the 2 current electrodes take the alternating voltage and create a current. This alternating current produces a Buffer Field from which polarization is absent. The voltage is then measured in this field assuring no altered readings.

Specifications:

Range: pH: 0 to 14 pH
 Conductivity: 0 to 10 mS/cm (mmho/cm)
 Accuracy (@20°C/68°F): pH: ±0.5% of full scale;
 Conductivity: ±2% of full scale
 Calibration: Manual through offset and slope trimmers for both pH and conductivity at:
 pH: 4/10 and 7 pH
 Conductivity: 0 and 5 mS/cm
 Temperature Compensation:
 Conductivity: automatic from 0 to 60°C (41 to 132°F) with a β of 2%
 Output: Two 4 to 20mA isolated
 Power: 12 to 24 VDC
 Protection: IP 54
 Environment: 0 to 50°C (32 to 122°F);
 0-95% RH (non-condensing)
 Transmitter Dimensions:
 160 L x 105 W x 31 H mm
 (6.3 x 4.1 x 1.2")



CDE-300 Probe Specifications



IN STOCK FOR FAST DELIVERY!

To Order (Specify Model No.)

Model No.	Price	Description
CDTX-300	\$295	pH and Conductivity transmitter
CDE-300	115	In-Line or submersible Conductivity Probe
PHE-7351-15	115	Industrial Electrode for In-Line or Submersion
PHA-4	5	4.00 pH Buffer Solution 475 ml bottle
PHA-7	5	7.00 pH Buffer Solution 475 ml bottle
PHA-10	5	10.00 pH Buffer Solution 475 ml bottle
CDS-4500	10	4500 microSiemens Conductivity Standard, 1 Q1

Comes complete operator's manual.

Ordering Example: CDTX-300, pH/conductivity transmitter, PHE-7351-15, pH electrode, PHA-7, 7.00 buffer solution, CDE-300, conductivity cell, CDS-4500, Conductivity standard
 \$295 + 115 + 5 + 115 + 10 = \$540.

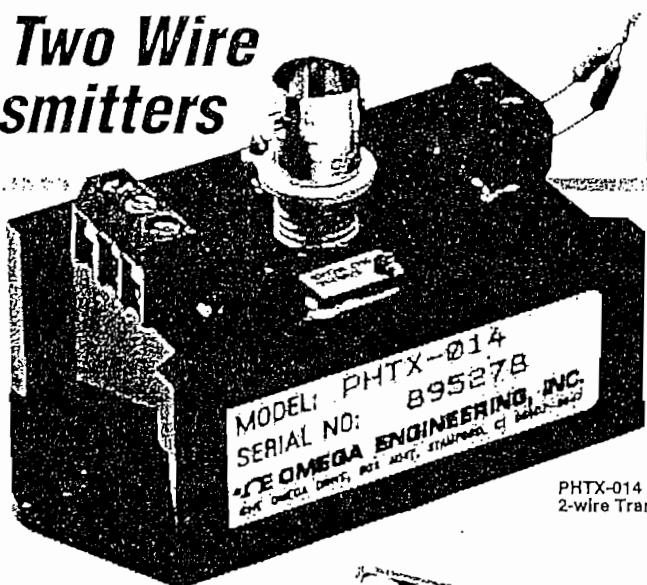
Order Online
omega.com

Over 100,000 Products Available!

For the complete selection of Conductivity,
 shop online at www.omega.com

Industrial pH Two Wire 4-20 mA Transmitters

MADE IN USA
1 YEAR WARRANTY



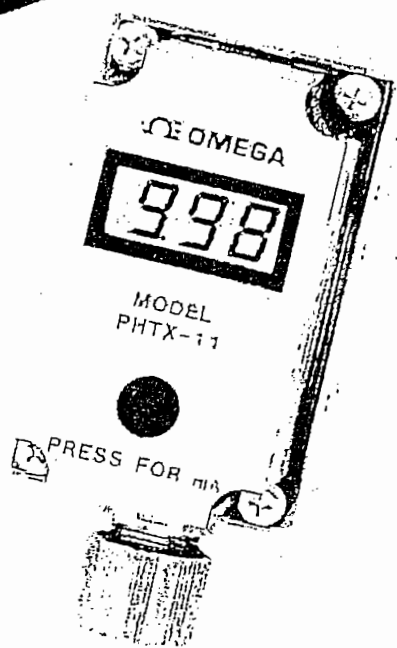
PHTX-014 Non-Isolated 2-wire Transmitter.

- ✓ Isolated or Non-Isolated Models Available
- ✓ 4 to 20 mA Output
- ✓ Manual or Automatic Temperature Compensation

The model PHTX-014 pH two wire transmitter is designed to provide a standard 4 to 20 mA current output which is proportional to the pH being measured. Its small size and encapsulated construction allow for easy installation and will accommodate any pH electrode with a BNC connector. Temperature compensation is either manual or automatic with use of any 1000Ω Platinum RTD. The PHTX-212 is the same as the PHTX-014 but with a range of 2 to 12 pH.

The PHTX-11 features include a NEMA 4X housing, an integral LCD display for continuous pH reading or for a direct corresponding readout in milliamps, using a convenient push-button switch. The 4-20 mA output signal may be scaled in the field to meet specific pH ranges in any 1 to 14 pH unit increment. Temperature compensation is manual using a fixed resistor or automatic using any of OMEGA's 700 Series thermistors.

\$189
PHTX-014 Series



PHTX-11 Isolated 4-20 mA Transmitter. Shown smaller than actual size. pH electrodes sold separately.

SPECIFICATIONS

Range: 0 to 14 pH
 Span: PHTX-014, 0 to 14 pH; PHTX-11 Any 1 to 14 pH unit, selectable with internal jumper pads
 Accuracy: ±0.02 pH
 Operating Temperature: PHTX-014, -25 to 70°C; PHTX-11 -10 to 60°C
 Display Resolution: PHTX-11 0.01 pH
 Input Impedance: > 10¹¹ Ohms
 Temperature Compensation: Manual: fixed resistors; Automatic: PHTX-014, 1000 Ω RTD; PHTX-11 OMEGA's 700 series thermistor
 Connector: BNC

Power: 12 to 80 Vdc (24 Vdc recommended)
 Output: PHTX-014, Non-isolated 4 to 20 mA; PHTX-11 isolated 4 to 20 mA
 Input to Output Isolation: PHTX-11, 600 V maximum

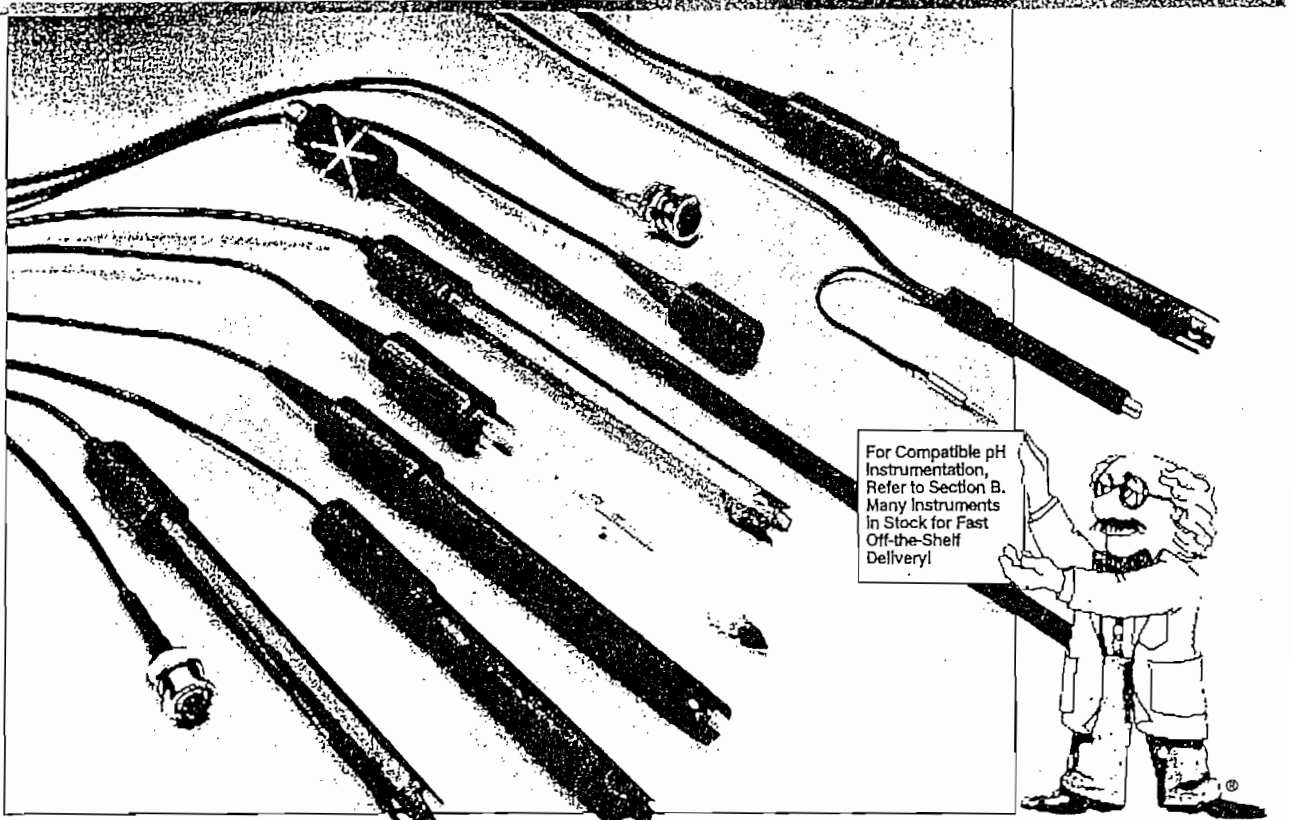
Dimensions: PHTX-014: 50.8 H x 38.1 W x 24.1 mm D (2 x 1.5 x 0.95"); PHTX-11: 125 H x 74.2 W x 99.6 mm D (4.92 x 2.92 x 3.92")
 Display: PHTX-11: 3½ digit LCD

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

Model	Price	Description
PHTX-212	\$189	Non-isolated 2 wire pH transmitter 2-12 pH
PHTX-014	189	Non-isolated 2-wire pH transmitter 0-14 pH
PHTX-11	430	Isolated 4-20 mA pH transmitter with integral display NEMA 4X enclosure
U24Y101	128	Power Supply 24 Vdc

Ordering Example:
 PHTX-11 Isolated 4-20 mA transmitter, U24Y101 power supply, \$430 + 128 = \$558.

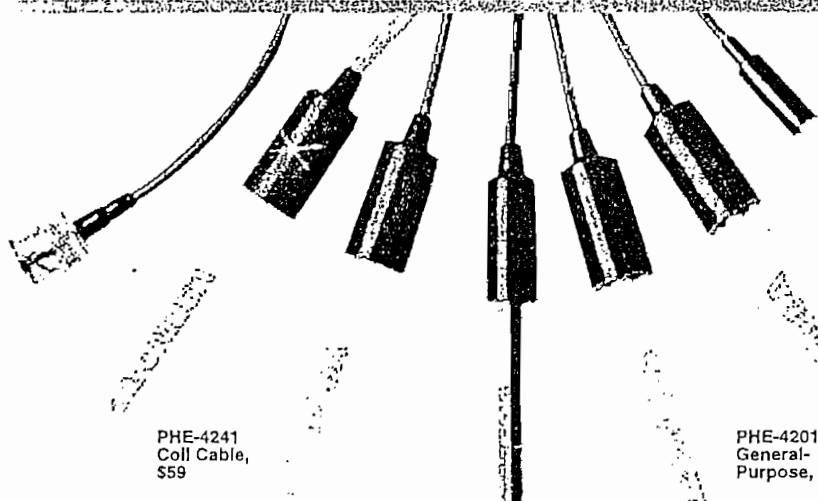
ALPHA[®] Series Rugged Gel-Filled Electrodes



Model No. BNC	Model No. U.S. Std.	Application	Insertion Lgth mm (in)	Diameter mm (in)	pH Range	Temp. C (F)
PHE-1311	PHE-1311-U	General purpose	150 (6)	12 (.47)	0-14	0-100 (32-212)
PHE-1411	PHE-1411-U	General purpose for samples requiring double junction	150 (6)	12 (.47)	0-14	0-100 (32-212)
PHE-1332	PHE-1332-U	Test tubes	150 (6)	6 (.24)	0-14	0-100 (32-212)
PHE-1432	PHE-1432-U	Test tubes for samples requiring double junction	150 (6)	6 (.24)	0-14	0-100 (32-212)
PHE-1335	PHE-1335-U	Extra long test tubes (detachable style shown)	300 (12)	6 (.24)	0-13	0-100 (32-212)
PHE-1471	PHE-1471-U	Measurement of flat surfaces for samples requiring double junction	150 (6)	12 (.47)	0-14	0-100 (32-212)
PHE-2385	PHE-2385-U	Rugged puncture tip for meats, cheeses, fruits, leather	55 (2.2)	8 (.31)	0-13	0-100 (32-212)
PHE-1317	PHE-1317-U	Economical with removable guard and Teflon [®] junction	110 (4.3)	12 (.47)	0-13	0-100 (32-212)
PHE-1417	PHE-1417-U	Economical with double Teflon [®] junction	110 (4.3)	12 (.47)	0-12	0-80 (32-176)
PHE-1304	PHE-1304-U	Economy	90 (3.5)	12.5 (.49)	0-12	0-80 (32-176)
ORE-1311	ORE-1311-U	General purpose ORP	150 (6)	12 (.47)	±2000 mV	0-100 (32-212)
ORE-1411	ORE-1411-U	Double junction ORP for interfering ions such as zinc, copper or sulfide	150 (6)	12 (.47)	±2000 mV	0-100 (32-212)

All electrodes supplied with 3/4 to 1 m (2 1/2 to 3 ft.) cable. For other configurations, see page CC-4.
For additional lead length, add desired length in feet as suffix to electrode number and add \$1 per additional foot to price.

Clear Epoxy-Bodied, Gel-Filled Combination ALPHA® Electrodes



PHE-4241
Coil Cable,
\$59

PHE-4201
General-
Purpose, \$51

PHE-4272
Flat Surface
Double
Junction, \$93

PHE-4222
Flask Size,
\$72

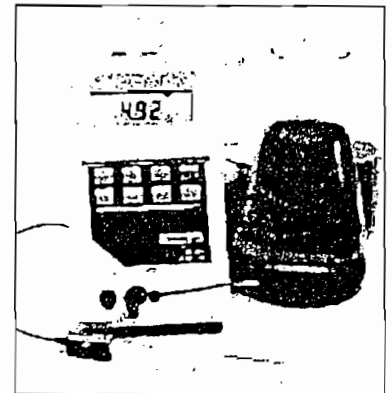
PHE-4200 Series

\$53



Basic Unit

- ✓ Five Electrode Styles
- ✓ Covers Entire 0 to 14 pH Range
- ✓ Clear Epoxy Body Construction
- ✓ Fast Responding: 95% in Less than 1 Second
- ✓ One-Year Guaranteed Shelf Life
- ✓ Comes with OMEGA Quality Certificate



PHE-4202
Double
Junction,
\$62

OMEGA Engineering is pleased to offer a complete line of laboratory pH electrodes. The PHE-4200 Series are gel-filled, combination pH electrodes with a unique clear epoxy body design. With five electrode styles to choose from, you're sure to find one suitable for your application.

OMEGA® PHE-4200 electrodes offer reliable quality at a reasonable cost. The electrodes measure the entire pH range from 0 to 14 pH units at 0 to 100°C (32 to 212°F) and feature an Ag/AgCl reference and polypropylene liquid junction. Each electrode comes in a soaker storage bottle to keep the electrode moist and ready for use. Shelf life is guaranteed for one year, and the OMEGA quality certificate provided assures that these electrodes meet the most stringent quality control requirements.

Certificate of Quality

This electrode has been manufactured to the most stringent quality control standards. It has been shipped in a special soaker/storage bottle to ensure its quality.

Your electrode has been 100% inspected prior to shipment and meets or exceeds all factory performance specifications.

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

Model No.	Description	Length (mm. (in.))	Tip Dia. (mm. (in.))	pH Range	Price
PHE-4201	Gen. purpose	150 (6)	12 (.47)	50-80	\$53
PHE-4202	Double junction	150 (6)	12 (.47)	50-80	65
PHE-4222	Flask size	300 (12)	9.5 (.37)	50-80	75
PHE-4272	Flat surface double junction	150 (6)	12 (.47)	50-80	98
PHE-4232	Semi-micro	150 (6)	6 (.24)	50-80	88
PHE-4241	Coil cable	150 (6)	12 (.47)	50-80	59

All electrodes are supplied with 750 mm (2 1/2 ft.) of cable and BNC connector.

Pre-Mixed pH Calibration Solutions



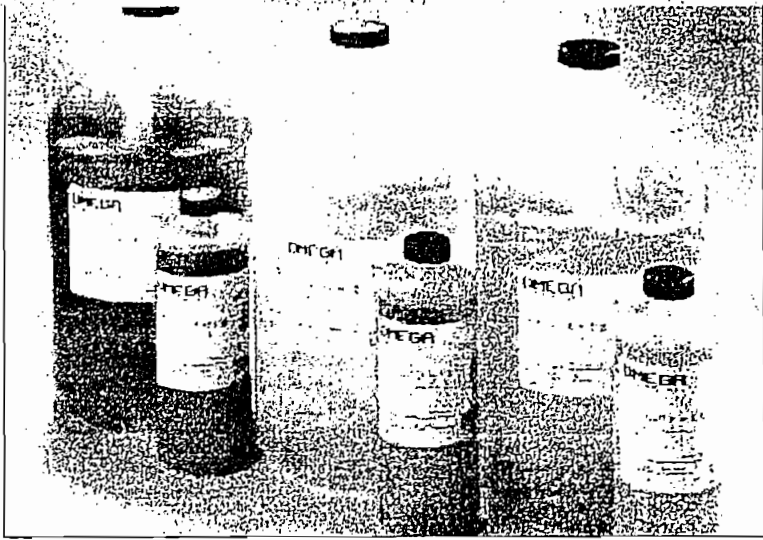
PHA Series

\$5

Basic Unit

- ✓ Pre-Mixed pH Solutions
- ✓ Two Bottle Sizes Available
- ✓ Standardized Against NIST Certified Sample

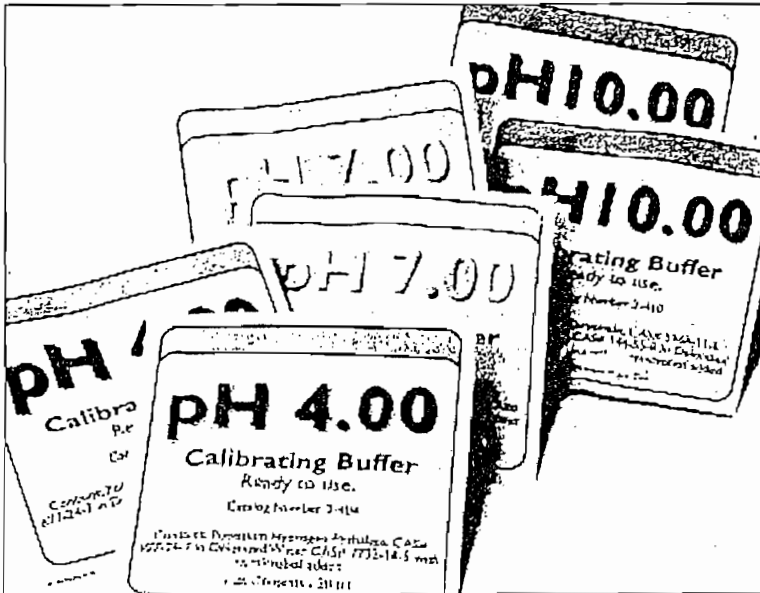
Formulated to provide precise pH determinations, these buffer solutions which are standardized against N.I.S.T.-certified reference samples, are ideal for calibrating electrodes and pH meters. The buffers are color-coded to avoid error and accurate to within ± 0.02 pH at 25°C (77°F). Each buffer contains a preservative/mold inhibitor and a shrink-sealed cap to prevent contamination and leakage. Temperature compensation charts are included with each buffer solution.



Part No.	Price	Description
PHA-4	\$5	4.01 pH buffer solution 475 ml bottle
PHA-4-GAL	18	4.01 pH buffer solution 3.8 L bottle
PHA-7	5	7.00 pH buffer solution 475 ml bottle
PHA-7-GAL	18	7.00 pH buffer solution 3.8 L bottle
PHA-10	5	10.01 pH buffer solution 475 ml bottle
PHA-10-GAL	18	10.01 pH buffer solution 3.8 L bottle

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

For NIST certificate of conformance, add suffix "-NIST" to part no. and add \$25 to price
 Ordering Example: PHA-7-GAL, 7.00 pH buffer solution 3.8 L bottle, \$18



PHA-20 Series

\$18

- ✓ Single-Use Packages

The PHA-20 pH buffer pouches are ideal for field use in calibration of pH electrodes and instrumentation. The sealed foil package prevents light, air and other contaminants from affecting the buffer solution. Each package contains enough solution for one calibration. Each box contains 20 pouches.

Part No.	Price	Description
PHA-20-4	\$18	pH buffer 4, 20 sealed pouches
PHA-20-7	18	pH buffer 7, 20 sealed pouches
PHA-20-10	18	pH buffer 10, 20 sealed pouches

Ordering Example: PHA-20-10, pH buffer solution for pH 10, 20 sealed pouches, \$18

**A5.- HOJA DE DATOS DEL
MICROCONTROLADOR PIC 16F872**



MICROCHIP

PIC16F872

28-Pin, 8-Bit CMOS FLASH Microcontroller

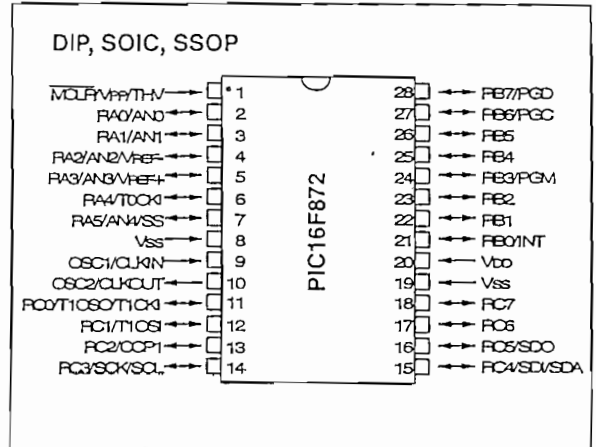
Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F872

Microcontroller Core Features:

- 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
- 2K x 14 words of FLASH Program Memory
128 x 8 bytes of Data Memory (RAM)
64 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C72A
- Interrupt capability (up to 10 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code-protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low-power, high-speed CMOS FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption:
 - < 2 mA typical @ 5V, 4 MHz
 - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
 - < 1 µA typical standby current

Pin Diagram



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
- One Capture, Compare, PWM module
 - 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
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master Mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

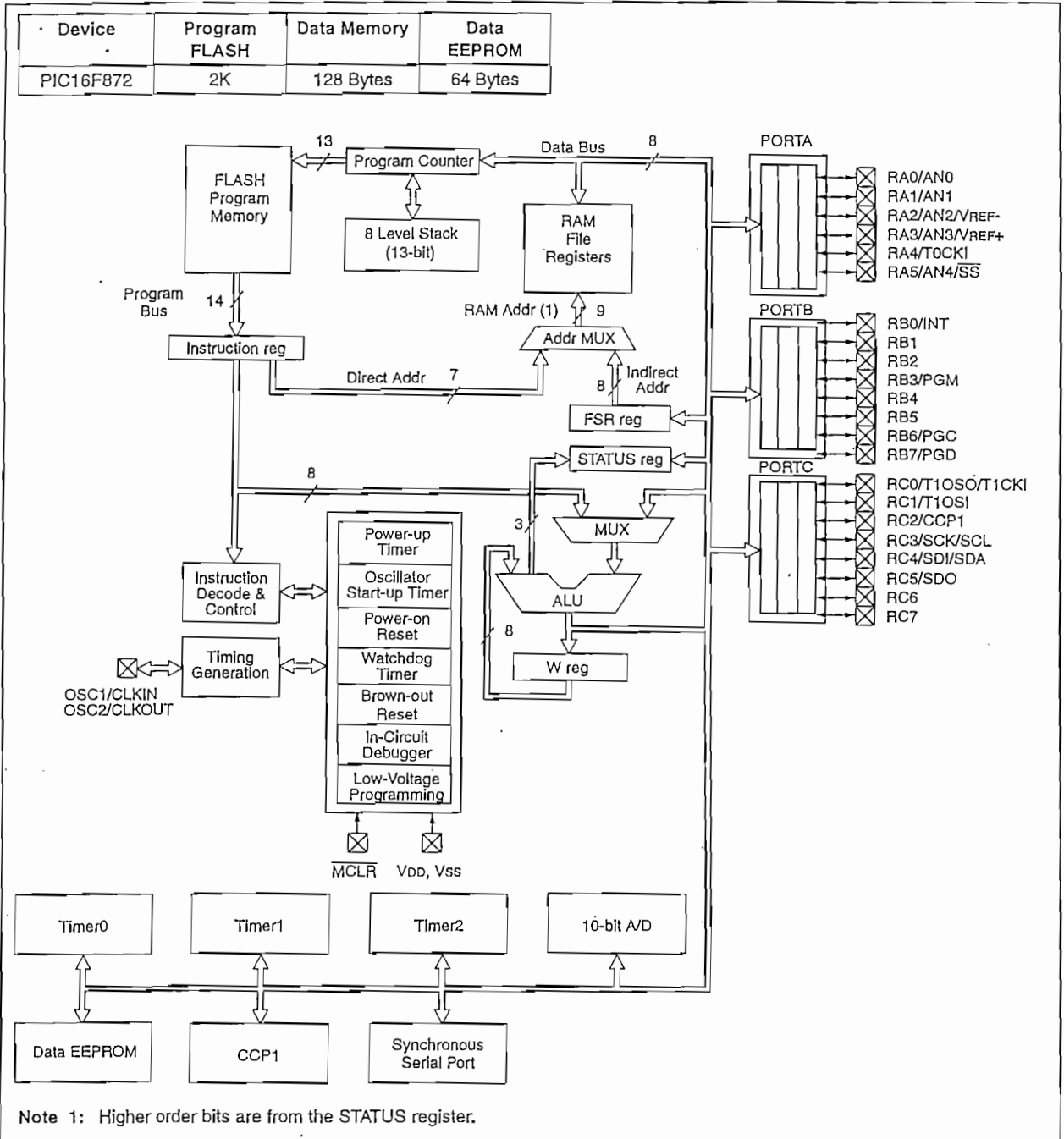
1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device-specific information. 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 website. The Reference Manual should be considered a comple-

mentary document to this data sheet, and is highly recommended reading for a better understanding of the device architecture and operation of the peripheral modules.

This data sheet covers the PIC16F872 device. The PIC16F872 is a 28-pin device and its block diagram is shown in Figure 1-1.

FIGURE 1-1: PIC16F872 BLOCK DIAGRAM



PIC16F872

TABLE 1-1: PIC16F872 PINOUT DESCRIPTION

Pin Name	DIP Pin#	SOIC Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
OSC1/CLKIN	9	9	I	ST/CMOS ⁽³⁾	Oscillator crystal input/external clock source input.
OSC2/CLKOUT	10	10	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in crystal oscillator mode. In RC mode, the OSC2 pin outputs CLKOUT, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate.
$\overline{MCLR}/V_{PP}/THV$	1	1	I/P	ST	Master clear (reset) input or programming voltage input or high voltage test mode control. This pin is an active low reset to the device.
RA0/AN0	2	2	I/O	TTL	<p>PORTA is a bi-directional I/O port.</p> <p>RA0 can also be analog input0.</p> <p>RA1 can also be analog input1.</p> <p>RA2 can also be analog input2 or negative analog reference voltage.</p> <p>RA3 can also be analog input3 or positive analog reference voltage.</p> <p>RA4 can also be the clock input to the Timer0 module. Output is open drain type.</p> <p>RA5 can also be analog input4 or the slave select for the synchronous serial port.</p>
RA1/AN1	3	3	I/O	TTL	
RA2/AN2/VREF-	4	4	I/O	TTL	
RA3/AN3/VREF+	5	5	I/O	TTL	
RA4/T0CKI	6	6	I/O	ST	
RA5/ \overline{SS} /AN4	7	7	I/O	TTL	
RB0/INT	21	21	I/O	TTL/ST ⁽¹⁾	<p>PORTB is a bi-directional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-up on all inputs.</p> <p>RB0 can also be the external interrupt pin.</p> <p>RB3 can also be the low voltage programming input.</p> <p>Interrupt on change pin.</p> <p>Interrupt on change pin.</p> <p>Interrupt on change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming clock.</p> <p>Interrupt on change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming data.</p>
RB1	22	22	I/O	TTL	
RB2	23	23	I/O	TTL	
RB3/PGM	24	24	I/O	TTL/ST ⁽¹⁾	
RB4	25	25	I/O	TTL	
RB5	26	26	I/O	TTL	
RB6/PGC	27	27	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	
RB7/PGD	28	28	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	
RC0/T1OSO/T1CKI	11	11	I/O	ST	<p>PORTC is a bi-directional I/O port.</p> <p>RC0 can also be the Timer1 oscillator output or Timer1 clock input.</p> <p>RC1 can also be the Timer1 oscillator input.</p> <p>RC2 can also be the Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output.</p> <p>RC3 can also be the synchronous serial clock input/output for both SPI and I²C modes.</p> <p>RC4 can also be the SPI Data In (SPI mode) or data I/O (I²C mode).</p> <p>RC5 can also be the SPI Data Out (SPI mode).</p>
RC1/T1OSI	12	12	I/O	ST	
RC2/CCP1	13	13	I/O	ST	
RC3/SCK/SCL	14	14	I/O	ST	
RC4/SDI/SDA	15	15	I/O	ST	
RC5/SDO	16	16	I/O	ST	
RC6	17	17	I/O	ST	
RC7	18	18	I/O	ST	
Vss	8, 19	8, 19	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	20	20	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
 — = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

- Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt or LVP.
 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in serial programming mode.
 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC oscillator mode and a CMOS input otherwise.

2.0 MEMORY ORGANIZATION

There are three memory blocks in each of these PICmicro® MCUs. The Program Memory and Data Memory have separate buses, so that concurrent access can occur, and is detailed in this section. The EEPROM data memory block is detailed in Section 4.0.

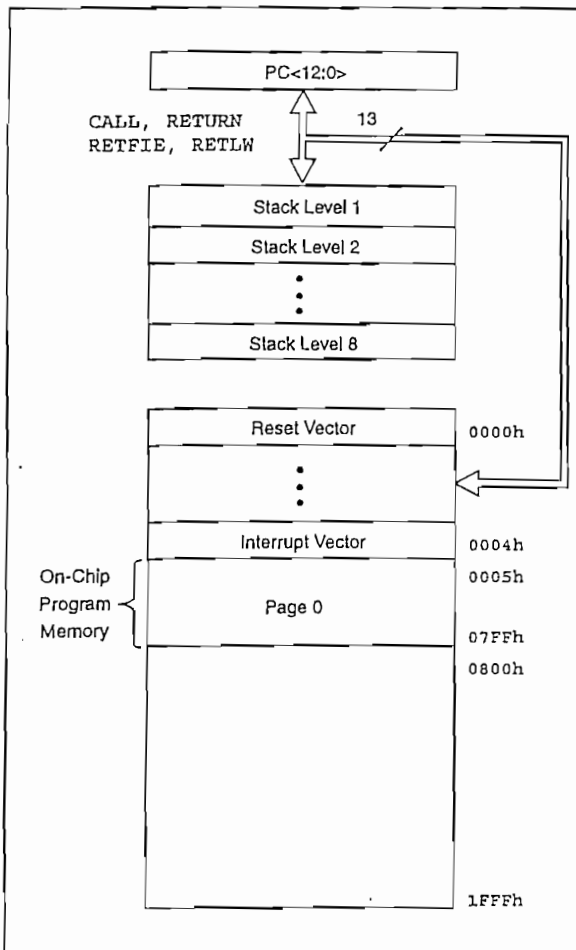
Additional information on device memory may be found in the PICmicro™ Mid-Range Reference Manual, (DS33023).

2.1 Program Memory Organization

The PIC16F872 devices have a 13-bit program counter capable of addressing an 8K x 14 program memory space. The PIC16F872 device has 2K x 14 words of FLASH program memory. Accessing a location above the physically implemented address will cause a wrap-around.

The reset vector is at 0000h and the interrupt vector is at 0004h.

FIGURE 2-1: PIC16F872 PROGRAM MEMORY MAP AND STACK



2.2 Data Memory Organization

The data memory is partitioned into multiple banks which contain the General Purpose Registers and the Special Function Registers. Bits RP1 (STATUS<6>) and RP0 (STATUS<5>) are the bank select bits.

RP<1:0>	Bank
00	0
01	1
10	2
11	3

Each bank extends up to 7Fh (128 bytes). The lower locations of each bank are reserved for the Special Function Registers. Above the Special Function Registers are General Purpose Registers, implemented as static RAM. All implemented banks contain Special Function Registers. Some "high use" Special Function Registers from one bank may be mirrored in another bank for code reduction and quicker access.

Note: EEPROM Data Memory description can be found in Section 4.0 of this Data Sheet.

2.2.1 GENERAL PURPOSE REGISTER FILE

The register file can be accessed either directly, or indirectly through the File Select Register FSR.

2.2.2 SPECIAL FUNCTION REGISTERS

The Special Function Registers are registers used by the CPU and peripheral modules for controlling the desired operation of the device. These registers are implemented as static RAM. A list of these registers is given in Table 2-1.

The Special Function Registers can be classified into two sets: core (CPU) and peripheral. Those registers associated with the core functions are described in detail in this section. Those related to the operation of the peripheral features are described in detail in the peripheral feature section.

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY

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 (2)	
Bank 0												
00h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)									0000 0000	0000 0000
01h	TMR0	Timer0 module's register									xxxx xxxx	uuuu uuuu
02h ⁽³⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte									0000 0000	0000 0000
03h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	T0	PD	Z	DC	C	0001 1xxx	000q quuu	
04h ⁽³⁾	FSR	Indirect data memory address pointer									xxxx xxxx	uuuu uuuu
05h	PORTA	PORTA Data Latch when written; PORTA pins when read									--0x 0000	--0u 0000
06h	PORTB	PORTB Data Latch when written; PORTB pins when read									xxxx xxxx	uuuu uuuu
07h	PORTC	PORTC Data Latch when written; PORTC pins when read									xxxx xxxx	uuuu uuuu
08h	—	Unimplemented									—	—
09h	—	Unimplemented									—	—
0Ah ^(1,3)	PCLATH	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter									---0 0000	---0 0000
0Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u	
0Ch	PIR1	(4)	ADIF	(4)	(4)	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	r0xr 0000	r0xr 0000	
0Dh	PIR2	—	(4)	—	EEIF	BCLIF	—	—	(4)	-r-0 0--r	-r-0 0--r	
0Eh	TMR1L	Holding register for the Least Significant Byte of the 16-bit TMR1 register									xxxx xxxx	uuuu uuuu
0Fh	TMR1H	Holding register for the Most Significant Byte of the 16-bit TMR1 register									xxxx xxxx	uuuu uuuu
10h	T1CON	—	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	T1SYNC	TMR1CS	TMR1ON	--00 0000	--uu uuuu	
11h	TMR2	Timer2 module's register									0000 0000	0000 0000
12h	T2CON	—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	-000 0000	-000 0000	
13h	SSPBUF	Synchronous Serial Port Receive Buffer/Transmit Register									xxxx xxxx	uuuu uuuu
14h	SSPCON	WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM3	SSPM2	SSPM1	SSPM0	0000 0000	0000 0000	
15h	CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register1 (LSB)									xxxx xxxx	uuuu uuuu
16h	CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register1 (MSB)									xxxx xxxx	uuuu uuuu
17h	CCP1CON	—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	--00 0000	--00 0000	
18h	—	Unimplemented									—	—
19h	—	Unimplemented									—	—
1Ah	—	Unimplemented									—	—
1Bh	—	Unimplemented									—	—
1Ch	—	Unimplemented									—	—
1Dh	—	Unimplemented									—	—
1Eh	ADRESH	A/D Result Register High Byte									xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Fh	ADCON0	ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON	0000 00-0	0000 00-0	

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.
Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.

2: Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.

3: These registers can be addressed from any bank.

4: These bits are reserved; always maintain these bits clear.

PIC16F872

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY (CONTINUED)

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 (2)
Bank 1											
80h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
81h	OPTION_REG	RBPU	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111
82h ⁽³⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
83h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001 1xxx	000q quuu
84h ⁽³⁾	FSR -	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
85h	TRISA	—	—	PORTA Data Direction Register						--11 1111	--11 1111
86h	TRISB	PORTB Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
87h	TRISC	PORTC Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
88h	—	Unimplemented								—	—
89h	—	Unimplemented								—	—
8Ah ^(1,3)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					---0 0000	---0 0000
8Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
8Ch	PIE1	(4)	ADIE	(4)	(4)	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	r0xr 0000	r0xr 0000
8Dh	PIE2	—	(4)	—	EEIE	BCLIE	—	—	(4)	-r-0 0--r	-r-0 0--r
8Eh	PCON	—	—	—	—	—	—	POR	BOR	---- --qq	---- --uu
8Fh	—	Unimplemented								—	—
90h	—	Unimplemented								—	—
91h	SSPCON2	GCEN	ACKSTAT	ACKDT	ACKEN	RCEN	PEN	RSEN	SEN	0000 0000	0000 0000
92h	PR2	Timer2 Period Register								1111 1111	1111 1111
93h	SSPADD	Synchronous Serial Port (I ² C mode) Address Register								0000 0000	0000 0000
94h	SSPSTAT	SMP	CKE	D/A	P	S	R/W	UA	BF	0000 0000	0000 0000
95h	—	Unimplemented								—	—
96h	—	Unimplemented								—	—
97h	—	Unimplemented								—	—
98h	—	Unimplemented								—	—
99h	—	Unimplemented								—	—
9Ah	—	Unimplemented								—	—
9Bh	—	Unimplemented								—	—
9Ch	—	Unimplemented								—	—
9Dh	—	Unimplemented								—	—
9Eh	ADRESL	A/D Result Register Low Byte								xxxx xxxx	uuuu uuuu
9Fh	ADCON1	ADFM	—	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	0--- 0000	0--- 0000

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.
Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

- Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2: Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.
- 3: These registers can be addressed from any bank.
- 4: These bits are reserved; always maintain these bits clear.

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY (CONTINUED)

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 (2)
Bank 2											
100h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
101h	TMR0	Timer0 module's register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
102h ⁽³⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
103h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	TO	PD	Z	DC	C	0001 1xxx	000q ruuu
104h ⁽³⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
105h	—	Unimplemented								—	—
106h	PORTB	PORTB Data Latch when written; PORTB pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
107h	—	Unimplemented								—	—
108h	—	Unimplemented								—	—
109h	—	Unimplemented								—	—
10Ah ^(1,3)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					---0 0000	---0 0000
10Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
10Ch	EEDATA	EEPROM data register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
10Dh	EEADR	EEPROM address register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
10Eh	EEDATH	—	—	EEPROM data register high byte					xxxx xxxx	uuuu uuuu	
10Fh	EEADRH	—	—	—	EEPROM address register high byte					xxxx xxxx	uuuu uuuu
Bank 3											
180h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
181h	OPTION_REG	RBPU	INTE0G	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111
182h ⁽³⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
183h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	TO	PD	Z	DC	C	0001 1xxx	000q ruuu
184h ⁽³⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
185h	—	Unimplemented								—	—
186h	TRISB	PORTB Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
187h	—	Unimplemented								—	—
188h	—	Unimplemented								—	—
189h	—	Unimplemented								—	—
18Ah ^(1,3)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					---0 0000	---0 0000
18Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
18Ch	EECON1	EEPGD	—	—	—	WREAR	WREN	WR	RD	x--- x000	x--- u000
18Dh	EECON2	EEPROM control register2 (not a physical register)								---- ----	---- ----
18Eh	—	Reserved maintain clear								0000 0000	0000 0000
18Fh	—	Reserved maintain clear								0000 0000	0000 0000

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.
 Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

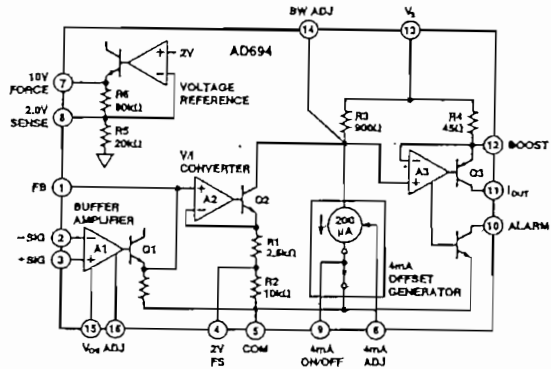
- Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2: Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.
- 3: These registers can be addressed from any bank.
- 4: These bits are reserved; always maintain these bits clear.

**A6.- HOJA DE DATOS DEL CIRCUITO
INTEGRADO AD694**

FEATURES

- 4–20 mA, 0–20 mA Output Ranges
- Precalibrated Input Ranges:
 - 0 V to 2 V, 0 V to 10 V
- Precision Voltage Reference
 - Programmable to 2.000 V or 10.000 V
- Single or Dual Supply Operation
- Wide Power Supply Range: +4.5 V to +36 V
- Wide Output Compliance
- Input Buffer Amplifier
- Open-Loop Alarm
- Optional External Pass Transistor to Reduce Self-Heating Errors
- 0.002% typ Nonlinearity

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT DESCRIPTION

The AD694 is a monolithic current transmitter that accepts high level signal inputs to drive a standard 4–20 mA current loop for the control of valves, actuators, and other devices commonly used in process control. The input signal is buffered by an input amplifier that can be used to scale the input signal or buffer the output from a current mode DAC. Precalibrated input spans of 0 V to 2 V and 0 V to 10 V are selected by simple pin strapping; other spans may be programmed with external resistor.

The output stage compliance extends to within 2 V of V_S and its special design allows the output voltage to extend below common in dual supply operation. An alarm warns of an open 4-to-20 mA loop or noncompliance of the output stage.

Active laser trimming of the AD694's thin film resistors results in high levels of accuracy without the need for additional adjustments and calibration. An external pass transistor may be used with the AD694 to off-load power dissipation, extending the temperature range of operation.

The AD694 is the ideal building block for systems requiring noise immune 4–20 mA signal transmission to operate valves, actuators, and other control devices, as well as for the transmission of process parameters such as pressure, temperature, or flow. It is recommended as a replacement for discrete designs in a variety of applications in industrial process control, factory automation, and system monitoring.

The AD694 is available in hermetically sealed, 16-pin cerdip and plastic SOIC, specified over the -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ industrial temperature range, and in a 16-pin plastic DIP, specified over the 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$ temperature range.

*Protected by U.S. Patents: 30,586; 4,250,445; 4,857,862.

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.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD694 is a complete voltage in to 4–20 mA out current transmitter.
2. Pin programmable input ranges are pre-calibrated at 0 V to 2 V and 0 V to 10 V.
3. The input amplifier may be configured to buffer and scale the input voltage, or to serve as an output amplifier for current output DACs.
4. The output voltage compliance extends to within 2 V of the positive supply and below common. When operated with a 5 V supply, the output voltage compliance extends 30 V below common.
5. The AD694 interfaces directly to 8-, 10-, and 12-bit single supply CMOS and bipolar DACs.
6. The 4 mA zero current may be switched on and off with a TTL control pin, allowing 0–20 mA operation.
7. An open collector alarm warns of loop failure due to open wires or noncompliance of the output stage.
8. A monitored output is provided to drive an external pass transistor. The feature off-loads power dissipation to extend the temperature range of operation and minimize self-heating error.

AD694—SPECIFICATIONS

(@ +25°C, $R_L = 250 \Omega$ and $V_S = +24 \text{ V}$, unless otherwise noted)

Model	AD694JN/AQ/AR			AD694BQ/BR			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT CHARACTERISTICS							
Input Voltage Range	-0.2	$V_S - 2.0 \text{ V}$	$V_S - 2.5 \text{ V}$	-0.2	$V_S - 2.0 \text{ V}$	$V_S - 2.5 \text{ V}$	V
Input Bias Current							nA
Either Input, T_{MIN} to T_{MAX}		1.5	5		1.5	5	nA
Offset Current, T_{MIN} to T_{MAX}		± 0.1	± 1		± 0.1	± 1	nA
Offset Current Drift		± 1.0	± 5.0		± 1.0	± 5.0	pA/°C
Input Impedance	5			5			M Ω
OUTPUT CHARACTERISTICS							
Operating Current Range	0		23	0		23	mA
Specified Performance	4		20	4		20	mA
Output Voltage Compliance	$V_S - 36 \text{ V}$		$V_S - 2 \text{ V}$	$V_S - 36 \text{ V}$		$V_S - 2 \text{ V}$	V
Output Impedance, 4–20 mA	40.0	50.0		40.0	50.0		M Ω
Current Limit (@ 2 × FS Overdrive)	24		44	24		44	mA
Slew Rate		1.3			1.3		mA/ μ s
SPAN AND ZERO ACCURACY¹							
4 mA Offset Error @ 0 V Input ²							μ A
Error from 4.000 mA, 4 mA On		± 10	± 20		± 5	± 10	μ A
Error from 0.000 mA, 4 mA Off	0	+10	+20	0	+5	+10	μ A
T_{MIN} to T_{MAX}		± 10	± 40		± 5	± 20	μ A
vs. Supply (2 V Span/10 V Span)		0.3/0.05	0.8/0.4		0.3/0.05	0.8/0.4	μ A/V
Trim Range, 4 mA Zero	2.0		4.8	2.0		4.8	mA
Span							
Nominal Transfer Function							
Input FS = 2 V		8.0			8.0		mA/V
Input FS = 10 V		1.6			1.6		mA/V
Transfer Function Error from Nom,							
Input FS = 2 V, 10 V		± 0.1	± 0.3		± 0.05	± 0.15	% of Span
T_{MIN} to T_{MAX}		± 0.002	± 0.005		± 0.001	± 0.0025	% of Span/°C
vs. Supply		± 0.001	± 0.005		± 0.001	± 0.005	% of Span/V
Nonlinearity ³		± 0.005	± 0.015		± 0.001	± 0.005	% of Span
4 mA On: Max Pin 9 Voltage	3.0		0.8	3.0		0.8	V
4 mA Off: Min Pin 9 Voltage		2.5			2.5		V
VOLTAGE REFERENCE							
Output Voltage: 10 V Reference	9.960	10.000	10.040	9.980	10.000	10.020	V
Output Voltage: 2 V Reference	1.992	2.000	2.008	1.996	2.000	2.004	V
T_{MIN} to T_{MAX} ⁴		30	50		20	30	ppm/°C
vs. Load, $V_{REF} = 2 \text{ V}$, 10 V		0.15	0.50		0.15	0.50	mV/mA
vs. Supply, $V_{REF} = 2 \text{ V}$, 10 V		± 0.001	± 0.005		± 0.001	± 0.005	%/V
Output Current							
Source	5			5			mA
Sink		0.2			0.2		mA
ALARM CHARACTERISTICS							
$V_{CE(SAT)}$ @ 2.5 mA		0.35			0.35		V
Leakage Current			± 1			± 1	μ A
Alarm Pin Current (Pin 10)		20			20		mA
POWER REQUIREMENTS							
Specified Performance		24			24		V
Operating Range							
2 V FS, $V_{REF} = 2 \text{ V}$	4.5		36	4.5		36	V
2 V, 10 V FS, $V_{REF} = 2 \text{ V}$, 10 V	12.5		36	12.5		36	V
Quiescent Current, 4 mA Off		1.5	2.0		1.5	2.0	mA
TEMPERATURE RANGE							
Specified Performance ⁵	AD694AQ/BQ/AR/BR	-40	+85	-40	+85		°C
	AD694JN	0	+70	0	+70		°C
Operating	AD694AQ/BQ/AR/BR	-55	+125	-55	+125		°C
	AD694JN	-40	+85	-40	+85		°C

Model	AD694JN/AQ/AR			AD694BQ/BR			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
BUFFER AMPLIFIER⁶							
Input Offset Voltage							
Initial Offset		±150	±500		±50	±500	µV
T_{MIN} to T_{MAX}		±2	±3		±2	±3	µV/°C
vs. Supply	80	90		80	90		dB
vs. Common Mode	80	90		80	90		dB
Trim Range	±2.5	±4.0		±2.5	±4.0		mV
Frequency Response							
Unity Gain, Small Signal		300			300		kHz
Input Volage Noise (0.1 Hz to 10 Hz)		2			2		µV p-p
Open-Loop Gain							
$V_O = +10$ V, $R_L \geq 10$ kΩ		50			50		V/mV
Output Voltage @ Pin 1, FB¹							
Minimum Output Voltage		1.0	10		1.0	10	mV
Maximum Output Voltage	$V_S - 2.5$ V	$V_S - 2$ V		$V_S - 2.5$ V	$V_S - 2$ V		V

NOTES

- ¹The single supply op amps of the AD694, lacking pull down current, may not reach 0.000 V at their outputs. For this reason, span, offset, and nonlinearity are specified with the input amplifiers operating in their linear range. The input voltage used for the tests is 5 mV to 2 V and 5 mV to 10 V for the two precalibrated input ranges. Span and zero accuracy are tested with the buffer amplifier configured as a follower.
- ²Offset at 4 mA out and 0 mA out are extrapolated to 0.000 V input from measurements made at 5 mV and at full scale. See Note 1.
- ³Nonlinearity is specified as the maximum deviation of the output, as a % of span, from a straight line drawn through the endpoints of the transfer function.
- ⁴Voltage reference drift guaranteed by the Box Method. The voltage reference output over temperature will fall inside of a box whose length is determined by the temperature range and whose height is determined by the maximum temperature coefficient multiplied by the temperature span in degrees C.
- ⁵Devices tested at these temperatures with a pass transistor. Allowable temperature range of operation is dependent upon internal power dissipation. Absolute maximum junction and case temperature should not be exceeded. See section: "Power Dissipation Considerations."
- ⁶Buffer amplifier specs for reference. Buffer amplifier offset and drift already included in Span and Zero accuracy specs above.

Specifications subject to change without notice.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	+36 V
V_S to I_{OUT}	+36 V
Input Voltage, (Either Input Pin 2 or 3)	-0.3 V to +36 V
Reference Short Circuit to Common	Indefinite
Alarm Voltage, Pin 10	+36 V
4 mA Adj, Pin 6	+1 V
4 mA On/Off, Pin 9	0 V to 36 V
Storage Temperature Range	
AD694Q	-65°C to +150°C
AD694N, R	-65°C to +125°C
Lead Temperature, 10 sec Soldering	+300°C
Maximum Junction Temperature	+150°C
Maximum Case Temperature	
Plastic Package (N, R)	+125°C
Cerdip Package (Q)	+125°C

Transistor Count:75 Active Devices
 Substrate Connection: to Com, Pin 5

Thermal Characteristics:

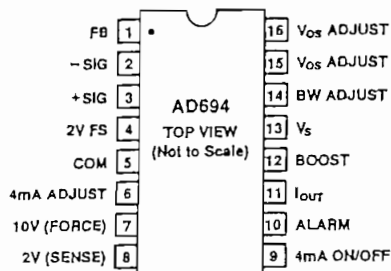
Plastic (N) Package:	$\theta_{JC} = 50^\circ\text{C/Watt}$ θ_{CA} (Still Air) = 85°C/Watt
Cerdip (Q) Package:	$\theta_{JC} = 30^\circ\text{C/Watt}$ θ_{CA} (Still Air) = 70°C/Watt
Plastic (R) Package:	$\theta_{JC} = 27^\circ\text{C/Watt}$ θ_{CA} (Still Air) = 73°C/Watt

ESD Susceptibility

All pins are rated for a minimum of 4000 V protection, except for Pins 2, 3 and 9 which are rated to survive a minimum of 1500 V. ESD testing conforms to Human Body Model. Always practice ESD prevention.

No pin, other than I_{OUT} (11) and \pm Sig (2), (3) as noted, may be permitted to become more negative than Com (5). No pin may be permitted to become more positive than V_S (13).

PIN CONFIGURATION (N, R, Q PACKAGE)



ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Package Option*
AD694JN	0°C to +70°C	N-16
AD694AQ	-40°C to +85°C	Q-16
AD694AR	-40°C to +85°C	R-16
AD694BQ	-40°C to +85°C	Q-16
AD694BR	-40°C to +85°C	R-16

*N = Plastic DIP; Q = Cerdip, R = SOIC.

**A7.- HOJA DE DATOS DEL CIRCUITO
INTEGRADO AD620**

FEATURES
EASY TO USE

Gain Set with One External Resistor
(Gain Range 1 to 1000)

Wide Power Supply Range (± 2.3 V to ± 18 V)
Higher Performance than Three Op Amp IA Designs
Available in 8-Lead DIP and SOIC Packaging
Low Power, 1.3 mA max Supply Current

EXCELLENT DC PERFORMANCE ("B GRADE")

50 μ V max, Input Offset Voltage
0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, Input Offset Drift
1.0 nA max, Input Bias Current
100 dB min Common-Mode Rejection Ratio (G = 10)

LOW NOISE

9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, @ 1 kHz, Input Voltage Noise
0.28 μ V p-p Noise (0.1 Hz to 10 Hz)

EXCELLENT AC SPECIFICATIONS

120 kHz Bandwidth (G = 100)
15 μ s Settling Time to 0.01%

APPLICATIONS

Weigh Scales
ECG and Medical Instrumentation
Transducer Interface
Data Acquisition Systems
Industrial Process Controls
Battery Powered and Portable Equipment

PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to

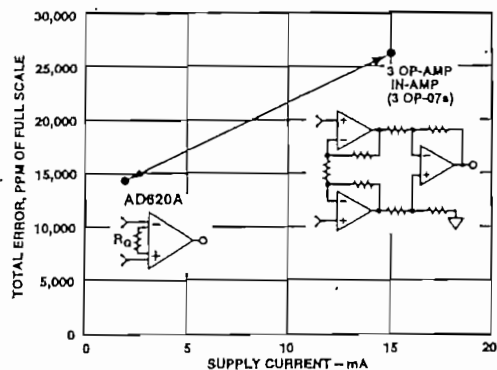
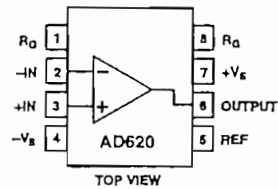


Figure 1. Three Op Amp IA Designs vs. AD620

CONNECTION DIAGRAM

8-Lead Plastic Mini-DIP (N), Cerdip (Q)
and SOIC (R) Packages



1000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs, and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50 μ V max and offset drift of 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weigh scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of Superbeta processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz, 0.28 μ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15 μ s to 0.01% and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

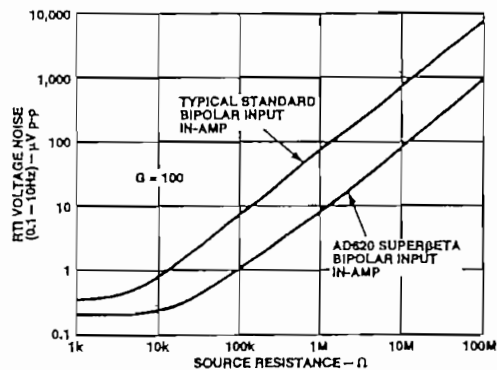


Figure 2. Total Voltage Noise vs. Source Resistance

REV. E

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

AD620—SPECIFICATIONS

(Typical @ +25°C, $V_S = \pm 15$ V, and $R_L = 2$ k Ω , unless otherwise noted)

Model	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN	$G = 1 + (49.4 \text{ k}/R_G)$										
Gain Range	$V_{OUT} = \pm 10$ V	1		10,000	1		10,000	1		10,000	
Gain Error ²											
$G = 1$			0.03	0.10		0.01	0.02		0.03	0.10	%
$G = 10$			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
$G = 100$			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
$G = 1000$			0.40	0.70		0.35	0.50		0.40	0.70	%
Nonlinearity, $G = 1-1000$	$V_{OUT} = -10$ V to $+10$ V, $R_L = 10$ k Ω		10	40		10	40		10	40	ppm
$G = 1-100$	$R_L = 2$ k Ω		10	95		10	95		10	95	ppm
Gain vs. Temperature	$G = 1$			10			10			10	ppm/ $^{\circ}$ C
	Gain $> 1^2$			-50			-50			-50	ppm/ $^{\circ}$ C
VOLTAGE OFFSET	(Total RTI Error = $V_{OS1} + V_{OSO}/G$)										
Input Offset, V_{OS1}	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V		30	125		15	50		30	125	μ V
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V			185			85			225	μ V
Average TC	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V		0.3	1.0		0.1	0.6		0.3	1.0	μ V/ $^{\circ}$ C
Output Offset, V_{OSO}	$V_S = \pm 15$ V		400	1000		200	500		400	1000	μ V
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V			1500			750			1500	μ V
Average TC	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V		5.0	15		2.5	7.0		5.0	15	μ V/ $^{\circ}$ C
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)	$V_S = \pm 2.3$ V to ± 18 V										
$G = 1$		80		100	80		100	80		100	dB
$G = 10$		95		120	100		120	95		120	dB
$G = 100$		110		140	120		140	110		140	dB
$G = 1000$		110		140	120		140	110		140	dB
INPUT CURRENT											
Input Bias Current			0.5	2.0		0.5	1.0		0.5	2	nA
Over Temperature				2.5			1.5			4	nA
Average TC			3.0			3.0			8.0		pA/ $^{\circ}$ C
Input Offset Current			0.3	1.0		0.3	0.5		0.3	1.0	nA
Over Temperature				1.5			0.75			2.0	nA
Average TC			1.5			1.5			8.0		pA/ $^{\circ}$ C
INPUT											
Input Impedance											
Differential			10||2			10||2			10||2		G Ω||pF
Common-Mode			10||2			10||2			10||2		G Ω||pF
Input Voltage Range ³	$V_S = \pm 2.3$ V to ± 5 V	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	V
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	V
Over Temperature		$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	V
Over Temperature		$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 2.3$		$+V_S - 1.4$	V
Common-Mode Rejection Ratio DC to 60 Hz with 1 k Ω Source Imbalance	$V_{CM} = 0$ V to ± 10 V		73	90		80	90		73	90	dB
$G = 10$			93	110		100	110		93	110	dB
$G = 100$			110	130		120	130		110	130	dB
$G = 1000$			110	130		120	130		110	130	dB
OUTPUT											
Output Swing	$R_L = 10$ k Ω , $V_S = \pm 2.3$ V to ± 5 V	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	V
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_S + 1.4$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 1.4$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.3$	V
Over Temperature		$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	V
Over Temperature		$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.5$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.5$	$-V_S + 2.3$		$+V_S - 1.5$	V
Short Current Circuit			± 18			± 18			± 18		mA

Model	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Units	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
DYNAMIC RESPONSE												
Small Signal -3 dB Bandwidth	10 V Step		1000		1000		1000		1000		kHz	
G = 1			800		800		800		800		kHz	
G = 10			120		120		120		120		kHz	
G = 100			12		12		12		12		kHz	
G = 1000			0.75	1.2		0.75	1.2		0.75	1.2		V/ μ s
Slew Rate				15		15		15		15		μ s
Settling Time to 0.01%			150		150		150		150		μ s	
G = 1000											μ s	
NOISE												
Voltage Noise, 1 kHz	$Total\ RTI\ Noise = \sqrt{(\epsilon_{ni}^2) + (\epsilon_{no}/G)^2}$		9	13		9	13		9	13	nV/\sqrt{Hz}	
Input, Voltage Noise, ϵ_{ni}			72	100		72	100		72	100	nV/\sqrt{Hz}	
Output, Voltage Noise, ϵ_{no}												
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz												
G = 1				3.0		3.0	6.0		3.0	6.0		μ V p-p
G = 10				0.55		0.55	0.8		0.55	0.8		μ V p-p
G = 100-1000			0.28		0.28	0.4		0.28	0.4		μ V p-p	
Current Noise	$f = 1\ kHz$		100		100		100		100		fA/\sqrt{Hz}	
0.1 Hz to 10 Hz			10		10		10		10		pA p-p	
REFERENCE INPUT												
R_{IN}	$V_{IN+}, V_{REF} = 0$		20		20		20		20		k Ω	
I_{IN}			+50	+60		+50	+60		+50	+60	μ A	
Voltage Range			$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$	V	
Gain to Output				1 ± 0.0001			1 ± 0.0001			1 ± 0.0001		
POWER SUPPLY												
Operating Range ⁴	$V_S = \pm 2.3\ V\ to\ \pm 18\ V$		± 2.3	± 18		± 2.3	± 18		± 2.3	± 18	V	
Quiescent Current			0.9	1.3		0.9	1.3		0.9	1.3	mA	
Over Temperature			1.1	1.6		1.1	1.6		1.1	1.6	mA	
TEMPERATURE RANGE												
For Specified Performance			-40 to +85		-40 to +85		-40 to +85		-55 to +125		$^{\circ}C$	

NOTES

¹See Analog Devices military data sheet for 883B tested specifications.²Does not include effects of external resistor R_G .³One input grounded, $G = 1$.⁴This is defined as the same supply range which is used to specify PSR.

Specifications subject to change without notice.

AD620

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS¹

Supply Voltage	.....	±18 V
Internal Power Dissipation ²	.....	650 mW
Input Voltage (Common Mode)	.....	±V _S
Differential Input Voltage	.....	±25 V
Output Short Circuit Duration	.....	Indefinite
Storage Temperature Range (Q)	.....	-65°C to +150°C
Storage Temperature Range (N, R)	.....	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range		
AD620 (A, B)	.....	-40°C to +85°C
AD620 (S)	.....	-55°C to +125°C
Lead Temperature Range		
(Soldering 10 seconds)	.....	+300°C

NOTES

¹Stresses 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.

²Specification is for device in free air:
 8-Lead Plastic Package: $\theta_{JA} = 95^{\circ}\text{C}/\text{W}$
 8-Lead Cerdip Package: $\theta_{JA} = 110^{\circ}\text{C}/\text{W}$
 8-Lead SOIC Package: $\theta_{JA} = 155^{\circ}\text{C}/\text{W}$

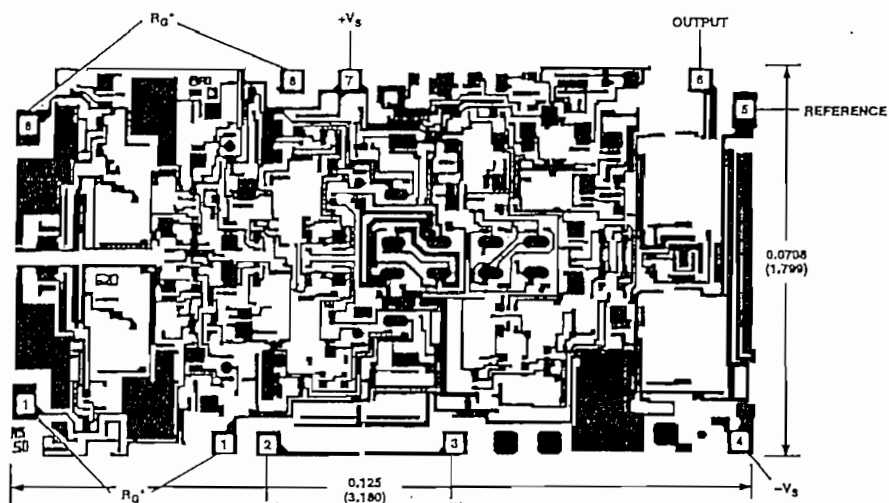
ORDERING GUIDE

Model	Temperature Ranges	Package Options*
AD620AN	-40°C to +85°C	N-8
AD620BN	-40°C to +85°C	N-8
AD620AR	-40°C to +85°C	SO-8
AD620AR-REEL	-40°C to +85°C	13" REEL
AD620AR-REEL7	-40°C to +85°C	7" REEL
AD620BR	-40°C to +85°C	SO-8
AD620BR-REEL	-40°C to +85°C	13" REEL
AD620BR-REEL7	-40°C to +85°C	7" REEL
AD620ACHIPS	-40°C to +85°C	Die Form
AD620SQ/883B	-55°C to +125°C	Q-8

*N = Plastic DIP; Q = Cerdip; SO = Small Outline.

METALIZATION PHOTOGRAPH

Dimensions shown in inches and (mm).
 Contact factory for latest dimensions.



*FOR CHIP APPLICATIONS: THE PADS 1R_G AND 8R_G MUST BE CONNECTED IN PARALLEL TO THE EXTERNAL GAIN REGISTER R_G. DO NOT CONNECT THEM IN SERIES TO R_G. FOR UNITY GAIN APPLICATIONS WHERE R_G IS NOT REQUIRED, THE PADS 1R_G MAY SIMPLY BE BONDED TOGETHER, AS WELL AS THE PADS 8R_G.

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 AD620 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.

