



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



“Diseño y construcción de un medidor de flujo másico utilizando el principio del tubo calentado”

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA

ING. JORGE ALBERTO VÁZQUEZ FERNÁNDEZ

ASESOR:

M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

CD. MADERO, TAM. MEXICO, MARZO DE 2008

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



“Diseño y construcción de un medidor de flujo másico utilizando el principio del tubo calentado”

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA

ING. JORGE ALBERTO VÁZQUEZ FERNÁNDEZ

JURADO

PRESIDENTE: M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

SECRETARIO: DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

VOCAL: M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ

SUPLENTE: M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS

CD. MADERO, TAM. MEXICO, MARZO DE 2008



Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica



Dirección General de Educación Superior Tecnológica



SEP

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

Cd. Madero, Tam. a 06/Marzo/2008

Área: Posgrado

Nº oficio: U2.044/08

Asunto: Autorización de Impresión de tesis

C. ING. JORGE ALBERTO VÁZQUEZ FERNÁNDEZ
Presente.

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE FLUJO MÁSCICO UTILIZANDO EL PRINCIPIO DEL TUBO CALENTADO”

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

Atentamente
“POR MI PATRIA Y POR MI BIEN”

M.P. María Yolanda Chávez Cinco
M.P. María Yolanda Chávez Cinco
Jefa de la División



S.E.P.
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACION
ITCM

MYCHC 'HCV' cerc*

“2008 Año de la Educación Física y el Deporte”

“Diseño y Construcción de un medidor de flujo másico utilizando el principio del tubo calentado”

Ing. Jorge Alberto Vázquez Fernández

Resumen

Muchas veces es necesario cuantificar el flujo de gases en aplicaciones e investigaciones de laboratorio, con la finalidad de obtener procesos más eficientes en donde se analizan propiedades tanto físicas como químicas de diversos compuestos.

La indicación de la medida de flujo es muy importante en diversos procesos químicos que pueden ser parte fundamental en la industria o en diversas aplicaciones de laboratorio.

Para utilizar un medidor de flujo másico es necesario precisar sus características. Las más importantes son: exactitud, rango de medición y costo.

El diseño y construcción de un medidor de flujo másico que utilice el principio del tubo calentado, tiene como finalidad ser un instrumento de trabajo dentro de las investigaciones que se realizan en el Laboratorio de Catálisis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.

Este prototipo tiene una alta exactitud en sus mediciones, será entendible y sencillo de utilizar y contará con dimensiones apropiadas para su utilización.

"Design and Construction of a mass flow meter using the principle of the tube heated"

Ing. Jorge Alberto Vázquez Fernández

Abstract

Often it is necessary to quantify the flow of gases in applications and research laboratory for the purpose of making more efficient processes in which examines both physical and chemical properties of various compounds.

The indication of the extent of flow is very important in various chemical processes that can be a fundamental part in industry or in various applications laboratory.

To use a mass flow meter is necessary to define its characteristics. The most important is accuracy, measurement range and cost.

The design and construction of a mass flow meter that uses the principle of heated tube, is intended as a working tool in the research being conducted at the Laboratory of Catalysis of the Master of Science in Chemical Engineering.

This prototype will be of high accuracy in their measurements, it will be understandable and easy to use and have the appropriate dimensions for use.

Indice

	<i>Página</i>
Resumen.....	i
Abstract	ii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	vi
Lista de Fotografías.....	vi
Lista de Fórmulas.....	vi
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Resumen.....	2
1.2 Planteamiento del Problema.....	3
1.3 Hipótesis.....	4
1.3.1. Hipótesis General.....	4
1.3.2. Hipótesis Específicas.....	4
1.4 Objetivo.....	5
1.5 Justificación.....	6
1.6 Alcances y Limitaciones.....	7
Capitulo 2: Marco Teórico	8
2.1 Flujo.....	9
2.1.1. Definiciones.....	9
2.1.2. Medida de flujo.....	9
2.2 Principio del tubo calentado.....	13
2.3 Termopar.....	14
2.4.1. Historia.....	16
2.4.2. Efecto Seebeck.....	16
2.4.3. Efecto Peltier.....	17
Efecto Thompson.....	18
2.4 Amplificador Operacional.....	18
2.4.1. Configuraciones de los amplificadores operacionales.....	19
2.4.1.1. Comparador de voltaje.....	19
2.4.1.2. Amplificador inversor.....	21
2.4.1.2. Amplificador no inversor.....	21
2.4.1.3. Amplificador separador de ganancia unidad.....	22
2.4.2. Voltaje de Offset.....	23
2.4.3. Voltaje Drift.....	24
2.5 Microcontrolador AT89S2051.....	24
2.5.1 Antecedentes.....	24
2.5.2 Características del Microcontrolador AT89S2051.....	27

Capítulo 3: Desarrollo del proyecto	29
3.1. Antecedentes.....	30
3.2. El medidor de flujo másico.....	30
3.3. Proceso General.....	32
3.4. Circuitos Analógicos.....	33
3.4.1. Fuente de alimentación general.....	33
3.4.1.1. Consideraciones generales.....	34
3.4.1.2. Diseño y construcción.....	34
3.4.2. Circuito diferenciador.....	38
3.4.3. Circuito amplificador inversor.....	39
3.5. Circuitos Digitales.....	40
3.5.1. Convertidor análogo - digital.....	40
3.5.2. Procesos del Microcontrolador.....	43
Capítulo 4: Resultados y Conclusiones	45
4.1 Resultados y Conclusiones.....	46
4.2 Trabajos a futuro.....	51
Apéndice A: Tabla Termopar tipo K.....	52
Apéndice B: Programa implementado.....	55
Apéndice C: Hojas de datos.....	68
Apéndice D: Participación en Eventos Académicos.....	77
Referencias	91

Lista de Figuras

		<i>Página</i>
Figura 2.1	Principio del tubo calentado.....	14
Figura 2.2	Principio de operación del termopar.....	15
Figura 2.3	Termopar tipo K.....	15
Figura 2.4	Representación del efecto Seebeck.....	17
Figura 2.5	Representación básica de un amplificador operacional.....	19
Figura 2.6	a) Comparador inversor, b) Comparador no inversor.....	19
Figura 2.7	Representación grafica de la salida del circuito inversor.....	20
Figura 2.8	Representación grafica de la salida del circuito no inversor.....	20
Figura 2.9	Configuración básica del amplificador inversor.....	21
Figura 2.10	Diagrama esquemático de un circuito amplificador no inversor.....	22
Figura 2.11	Diagrama esquemático de un circuito separador de ganancia de unidad.....	23
Figura 2.12	Distribución de pins del microcontrolador AT89S2051.....	27
Figura 3.1	Diagrama esquemático del proceso general.....	32
Figura 3.2	Fuente de alimentación para los circuitos con operacionales y la parte digital.....	35
Figura 3.3	Fuente de alimentación para la resistencia calefactora.....	37
Figura 3.4	Circuito básico del regulador ajustable LM350T.....	37
Figura 3.5	Circuito amplificador diferencial usado para la detección de los cambios de temperatura.....	38
Figura 3.6	Configuración básica del amplificador inversor.....	39
Figura 3.7	Diagrama funcional del ADC MAX1168.....	41
Figura 3.8	Circuito de operación del ADC MAX1168.....	42

Figura 3.9	Diagrama de conexiones del ADC MAX 1168 al microcontrolador	43
Figura 3.10	Diagrama de conexiones del microcontrolador AT89C2051	44

Lista de Tablas

		<i>Página</i>
Tabla A.1	Tabla termopar tipo K.....	54
Tabla 4.1	Relación entre presión a la salida del compresor y flujo.....	48
Tabla 4.2	Relación de presión con respecto a la corriente de salida del transmisor de presión Rosemount 2088.....	49
Tabla 4.3	Relación entre presiones y voltaje a la salida del medidor de flujo....	49

Lista de Fotografías

		<i>Página</i>
Fotografía 3.1	Sensor fabricado para medir el flujo másico de aire.....	30
Fotografía 3.2	Compresor de aire usado en las pruebas al prototipo.....	32
Fotografía 4.1	Manómetro del compresor.....	47
Fotografía 4.2	Transmisor de presión Rosemount modelo 2088.....	48

Lista de Fórmulas

		<i>Página</i>
Fórmula 2.1	Fórmula del amplificador inversor.....	21
Fórmula 2.2	Fórmula del amplificador no inversor.....	22
Fórmula 2.3	Fórmula del seguidor de voltaje.....	23
Fórmula 3.1	Fórmula conversión análoga-digital.....	40

Capítulo

1

Introducción

Este primer capítulo ofrece una descripción general del proyecto, y está destinado a proporcionar una fácil comprensión al lector.

Se inicia dando una explicación a la importancia que tiene la medición de variables en la industria, en especial la medición de flujo másico. A continuación se menciona la problemática existente en el laboratorio de catálisis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química y posteriormente se proporcionan los objetivos trazados, así como los alcances y limitaciones que ofrece este proyecto en forma general.

1.1.- RESUMEN

Actualmente, en la industria, la medición de variables de procesos es de suma importancia ya que de ello depende cuán óptima sea la mezcla o producto y por tanto se garantice el cumplimiento a las normas de calidad que rigen el proceso y se obtenga con ello el producto deseado.

La medición de flujo es el segmento más largo en cuanto a medición industrial en el mercado de la instrumentación. El segmento de flujo representa un 41% del total de ventas en equipos de medición, y es necesitado en muchas industrias incluyendo la del petróleo, química, pulpas, papel, aceite y gas. La medición de flujo es tradicionalmente más difícil y resulta más compleja que la medición de presión y temperatura.⁽¹⁾

Cuando es necesario utilizar un medidor de flujo, se tienen que analizar las condiciones a las cuales se va a someter dicho instrumento y por supuesto el uso que va a tener para después especificar las características que debe cumplir, como son: tipo de flujo (sólido, líquido, pulpa, gas), la exactitud, el rango de medición, que tan manipulable puede ser la variable, además de la calidad del producto y su costo. Este proyecto tiene la firme intención de presentar un diseño con características e indicaciones especiales para un medidor de flujo gaseoso, en este caso aire.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de las instituciones académicas, muchas veces los laboratorios o talleres con que se cuentan no poseen los instrumentos de tipo industrial necesarios para la elaboración de prácticas o proyectos debido al alto costo que estos tienen.

Como parte de la formación académica dentro de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, se cuentan con bases y conocimientos necesarios para diseñar y elaborar un dispositivo que en un momento dado pueda sustituir a los ya existentes y de esta forma superar el problema por la falta de instrumentos en los laboratorios.

La propuesta en mente es realizar uno de estos instrumentos, que en este caso sería un medidor de flujo másico (gas) solicitado por el laboratorio de catálisis de la maestría en ciencias en ingeniería Química, con la finalidad de cubrir esta necesidad en los procesos que ellos manejan.

1.3 HIPÓTESIS

1.3.1 HIPÓTESIS GENERAL

Será posible realizar el diseño y construcción de un medidor de flujo másico de aire con lectura digital utilizando el principio del tubo calentado construido especialmente para resolver la problemática que se encuentra en el laboratorio de catálisis del área de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.

1.3.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Es posible medir flujo másico de aire en un rango de 5 ml/min hasta 1000 ml/min.
- Es posible conseguir una indicación de flujo másico de aire con una resolución de 1 ml/min y con una precisión aproximada de 3%.
- Es posible diseñarlo y construirlo de tal manera que se pueda utilizar dentro de las instalaciones del laboratorio de catálisis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.
- Es posible su construcción con elementos electrónicos del mercado nacional.

1.4 OBJETIVO

El principal objetivo de esta investigación es diseñar y construir un instrumento medidor de flujo capaz de indicar los caudales de aire que circulan a través de las tuberías con que cuenta el laboratorio de catálisis y así se solventen las necesidades que ahí dominan.

El siguiente objetivo a lo largo del proyecto será el costo del instrumento, con la intención de que éste sea lo más bajo posible. Esto se logrará ya que todas las piezas se conseguirán en el mercado nacional, además que el mantenimiento y reparaciones necesarias debidas al paso del tiempo se hará con personal de la localidad.

Otro objetivo es que el diseño estará enfocado a la fácil comprensión de las mediciones por parte del usuario. Y queda claro que la medición de flujo que se propone tiende a ser lo más preciso posible.

1.5 JUSTIFICACIÓN

En el laboratorio de catálisis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química existe la necesidad de tener un medidor de flujo másico ya que en la actualidad las pruebas de laboratorio que ahí se realizan no tienen una medición precisa de los gases que se ocupan. Por esto se propone realizar un medidor de flujo másico de aire que atienda las necesidades de mayor aplicación para este laboratorio y con ello se puedan realizar proyectos de una manera más confiable. Se escogió el aire ya que se puede conseguir más fácilmente que otros, tiene un costo mucho menor, es el gas más utilizado en el laboratorio de catálisis y, para fines de este proyecto, es el gas más práctico y manejable.

Además dentro de la materia de instrumentación de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica es de mucha utilidad ya que serviría como material de apoyo para entender el comportamiento, funcionamiento y como está construido un instrumento enfocado a la medición de una variable tan complicada como lo es el flujo.

En comparación con los existentes en el mercado, esta propuesta incluye un costo más bajo y con características similares. Otro punto a favor es que se incluirán componentes que se encuentran dentro del mercado nacional por tanto su reparación y mantenimiento se podrán realizar con personal de la localidad a un menor tiempo.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

En esta sección se indicarán los alcances que se pretenden lograr así como las limitaciones que implican la construcción de un medidor de flujo másico de este tipo.

Alcances

- Un rango de medición de flujo másico de aire de 5 ml/min a 1000 ml/min.
- Precisión en la medición del 3%.
- Diseño de circuitería sencillo.
- Manejo sencillo del instrumento.

Limitaciones

- Medición de flujo másico de aire limitado entre 5 ml/min y 1000 ml/min.
- Con el tiempo se descalibran los componentes analógicos.
- El medidor de flujo másico está limitado a usarse solamente con aire.

Capítulo

2

Marco Teórico

INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene la finalidad de mencionar los aspectos teóricos relacionados con el flujo másico. Además se indican las características más importantes de los elementos electrónicos que dan vida a este proyecto, por ejemplo el termopar, el amplificador operacional y el microcontrolador ya que sin ellos no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

Es necesario el estudio de estos temas para comprender más a fondo el funcionamiento del prototipo y la utilización de todos estos elementos.

2.1 FLUJO

2.1.1 Definiciones

Flujo: es el paso de líquidos o gases en respuesta a una fuerza (por ejemplo presión o gravedad).

Taza de flujo: velocidad actual o velocidad de movimiento del fluido.

Medidor de flujo: un dispositivo usado para medir el flujo o la cantidad de un fluido en movimiento.

2.1.2 MEDIDA DE FLUJO

La medida de flujo que circula por una tubería o por un canal es un parámetro que tiene una gran importancia a nivel industrial, fundamentalmente en el primer caso puesto que en gran número de plantas industriales se usan u obtienen distintos tipos de fluidos (combustibles, gases, líquidos de refrigeración, productos líquidos o gaseosos, etc.) que circulan a través de diversos conductos.

La cuantificación de lo que está ocurriendo en el interior de esos conductos se hará midiendo las condiciones del flujo que llevan lo que se consigue mediante algunos parámetros de interés:

Velocidad de fluido: magnitud expresada en m/s (metros por segundo) y que tiene interés como tal, sólo en algunas ocasiones por ejemplo canales abiertos o tuberías no llenas, casos en los que determinar otros parámetros más relevantes puede ser excesivamente complejo. La velocidad en un fluido no es un parámetro constante en cada punto de una determinada sección, sino que cambia de un punto a otro, siendo mínimo (casi nulo) en el fluido que está en contacto con las paredes. La curva de velocidad depende de un gran número de parámetros, tanto del fluido como del conducto y, por ello, se prefiere usar el valor medio

(velocidad media) en cada sección del conjunto. En el caso de tuberías no llenas o de canales, la velocidad no mide la cantidad de materia que fluye, sino que depende, además del área de la sección.

Caudal: esta magnitud se expresa en m^3/s (metros cúbicos por segundo) e indica el volumen del fluido que circula por el conducto o canal en cada unidad de tiempo. En el caso de los líquidos o fluidos incomprensibles (su volumen no se modifica con la presión) es una buena información de la cantidad de material que está circulando, mucho mejor que la anterior ya que ésta sí tiene en cuenta la velocidad y la sección tanto en conductos llenos como en tuberías no llenas y canales. En el caso de los gases y fluidos comprensibles, la dependencia del volumen con la presión y la temperatura hace que la medida del caudal no sea tan importante por cuanto obliga a emplear más parámetros para determinar la cantidad de material que fluye.

Flujo Másico: se expresa en kg/s (kilogramos por segundo) o en cualquier otra cantidad de masa/tiempo acorde con la cantidad de fluido y es la representación directa de la cantidad de materia que circula por un conducto³.

Los sensores de flujo determinarán alguno de estos parámetros y, con él, representarán la cantidad de material que circula por un canal abierto o por cualquier conducción cerrada. La mayoría de las medidas de flujo se hacen de forma indirecta, a través de una variable intermedia que es controlada por el flujo debido a lo cual hay una gran cantidad de tipos diferentes de sensores de flujo basados en diversos principios de la mecánica de fluidos y la termodinámica.

Por otra parte, las medidas de flujo suelen ser bastante complejas – y consecuentemente los sensores correspondientes – por cuanto los parámetros a tener en cuenta son muchos y de muy diversa índole. Puede afirmarse, casi sin lugar a dudas, que las medidas de flujo son las más complejas del mundo de la instrumentación en entornos industriales y que, en algunos casos, deberemos conformarnos con una aproximación que puede llegar a ser bastante grosera.

A la hora de definir los criterios para seleccionar un determinado sensor para la medida de velocidad de un fluido, caudal o flujo hay que tener en cuenta algunas cuestiones que no son comunes a los procesos de selección de sensores para otras variables: para empezar, el costo no es un parámetro importante en los primeros pasos de selección y sólo debe contemplarse al final del proceso, como una comprobación.

Para racionalizar el proceso de selección de sensores para medidas de flujo, vamos a fijar una serie de pasos:

Tipo de información: continua o totalizada. La información continua proporciona el valor del parámetro en tiempo real (velocidad, caudal ó flujo másico) lo que permite conocer la situación del conducto en cada momento. En muchas ocasiones, sin embargo, resulta mucho más relevante la totalización del material que ha circulado en un determinado tiempo o durante un proceso (como en el caso de una gasolinera en donde lo que importa es la cantidad total de combustible que se va a vender).

Acceso a la información: local ó remoto. La medida de flujo en una planta industrial puede implicar la toma de información en lugares muy distantes entre sí o muy lejanos de un hipotético centro de control, llegándose a alcanzar varios kilómetros en algunos casos. En este tipo de situaciones o cuando es necesario leer diversas informaciones de varios puntos simultáneamente, el acceso al punto de medida no es una buena política de control y se precisará un acceso remoto a la medida; en otros casos, con plantas pequeñas o con informaciones de tipo totalizador podrá usarse un indicador local que se consultaría un determinado número de veces a lo largo de la jornada.

Propiedades de Fluido: Las propiedades físicas del fluido pueden invalidar el empleo de determinado tipo de sensores. Se pueden citar muchos ejemplos, pero podemos pensar en lo mal que trabajaría un sensor formado por una pequeña hélice para medir la velocidad en un fluido muy viscoso y que circula con lentitud. Para no caer en absurdos de este tipo – aunque no tan extremos – se deberá tener en cuenta parámetros tales como la densidad, la conductividad (térmica y eléctrica), la viscosidad, la presión de vapor a la máxima

temperatura, la opacidad, la toxicidad, la inflamabilidad, la presencia de sólidos en suspensión, lo abrasivo que resulte, etc.

Propiedades del Flujo: Las condiciones del flujo tales como presión, las temperaturas extremas a las que pueda estar, su reversibilidad (posibilidad de fluir en ambos sentidos) la presencia de burbujas o espuma, el que sea laminar o turbulento pueden afectar a las medidas de determinados tipos de sensores o impedir el uso de otros. Cuando se habla de presión a la que está el fluido habrá que distinguir entre las condiciones normales y las extremas: por ejemplo, un dispositivo podrá trabajar correctamente en un margen de presión determinado que corresponde a las situaciones “normales” pero puede que no funcione correctamente en un caso extremo de los que no se dan casi nunca; posiblemente, en estos casos, sólo nos importará que el dispositivo soporte la situación aunque su medida se proporcione con mucho error.

Lugar de Medida: Este aspecto puede ser determinante en la elección del sensor y habrá que tener en cuenta el tamaño del conducto, la presencia de válvulas, los materiales del conducto, la presencia de vibraciones, de campos magnéticos y/o eléctricos, el riesgo de explosión, la necesidad de cumplir requisitos sanitarios, etc. La compatibilidad general entre el sensor y el lugar de medida es algo muy importante y que puede determinar el tipo de sensor a elegir o definir las características exigibles a un tipo concreto definido por los puntos anteriores⁴.

Margen de Medida y Precisión: Aunque pueda parecer absurdo, estos parámetros que, en casi todas las ocasiones, son algo básico a la hora de seleccionar, aquí tienen una importancia menor ya que de nada sirve un sensor que reúna todas las condiciones de alcance, precisión, etc., pero que no se puede instalar porque ponga en peligro la planta o porque, simplemente, no va poder funcionar correctamente en unas condiciones dadas. Esto significa que, por lo general, decidiremos en función de todos estos pasos el tipo de sensor que podemos aplicar y, luego, buscaremos aquellos que cumplan las condiciones de alcance, margen de medida o precisión, aunque podría ocurrir que tuviésemos que renunciar a algún requisito en este caso y recurrir a sistemas menos precisos de lo que hubiéramos deseado.

Una vez que los pasos anteriores hayan definido el sensor, el proceso continua: la instalación de un sensor de flujo, en la mayoría de los casos, suele suponer una interacción directa con el fluido por lo que el proceso no es muy sencillo y, en ocasiones lleva implícito un costo elevado y un procedimiento complejo: a veces implica la modificación de una instalación existente o el rediseño de una nueva para dar cabida a un determinado medidor, para prever su recalibración o su sustitución (que implica una retirada del sensor de la instalación) con la planta en marcha.

Un criterio de clasificación válido puede ser el tipo de interacción que se tiene con el fluido o cuál es la magnitud intermedia que se genera⁴.

De todos los métodos de medición de flujo en el mercado, existen algunos con baja interacción con el fluido y resultan muy útiles desde el punto de vista electrónico, entre ellos se encuentra el que utiliza el principio del tubo calentado.

2.2. PRINCIPIO DEL TUBO CALENTADO

La transmisión de calor entre dos puntos de una corriente de fluido o la capacidad de evacuar calor mediante un objeto a alta temperatura pueden ser empleados para la medida de flujo: en la figura 2.1 se muestra un sensor de flujo basado en la transferencia de calor entre una fuente y un sensor térmico a través del flujo.

Estos sensores resultan muy problemáticos cuando se pretende de ellos un uso general ya que la relación de la variable a medir (la temperatura del termistor) depende de muchos factores tales como si el flujo es laminar o turbulento, las características del fluido y de la

tubería, etc. Por ello, los sensores de este tipo suelen estar calibrados para determinados fluidos y determinados flujos³.

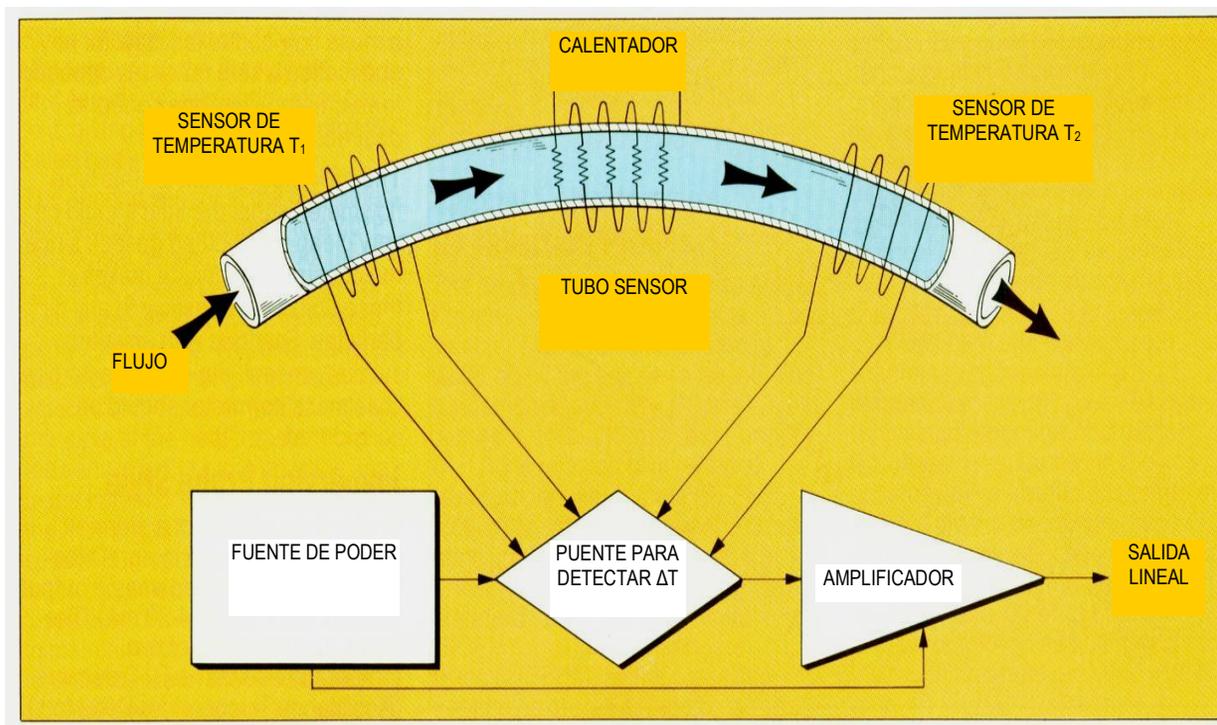


FIGURA 2.1.- Principio del tubo calentado.

2.3 TERMOPAR

Un termopar es un dispositivo para la medición de temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz a efecto Seebeck⁶, tal como lo muestra la figura 2.2.

La fuerza electromotriz generada por el termopar está en función de la diferencia de temperatura entre la unión fría y la caliente, pero más específicamente, ésta es generada como un resultado de los gradientes de temperatura los cuales existen a lo largo de la longitud de los conductores⁶.

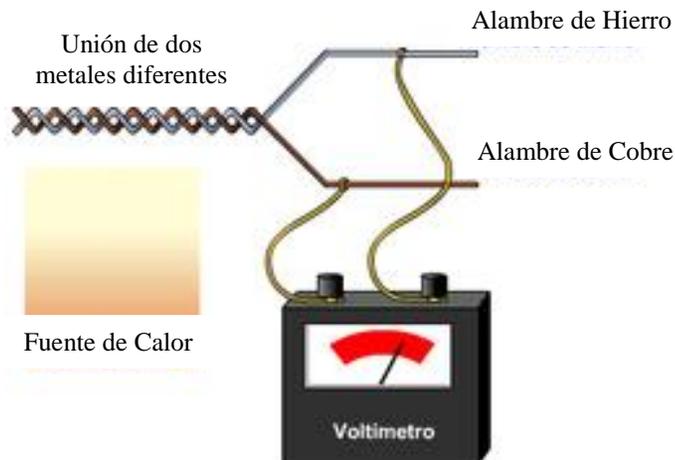


FIGURA 2.2.- Principio de operación del termopar.

La magnitud de la FEM (Fuerza Electromotriz) depende de los materiales de los conductores utilizados por el termopar y de sus condiciones metalúrgicas. Subsecuentes cambios en la composición del material causados por contaminación, mecanismos extraños o choques térmicos influyen y modifican la FEM.

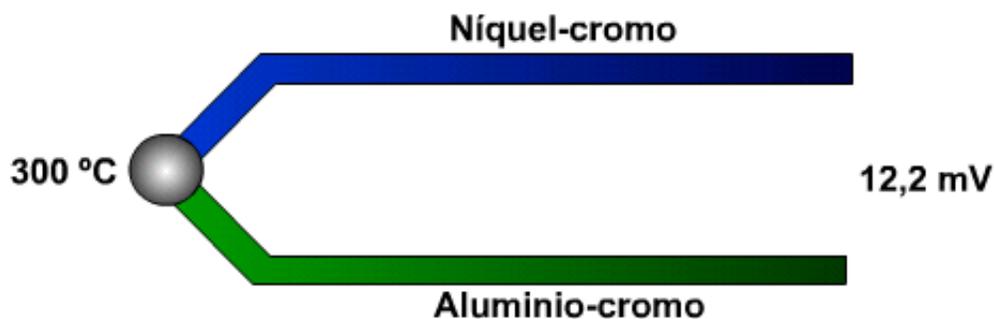


FIGURA 2.3.- Termopar tipo K

En el diagrama de la figura 2.3, el termopar tipo K producirá 12.2 mV a 300°C. Desafortunadamente no es posible conectar un voltímetro al termopar para medir este voltaje porque la conexión a las guías del voltímetro harán una segunda unión no deseada. Para

realizar mediciones precisas se debe compensar al usar una técnica conocida como *compensación de unión fría (CUF)*.

La *ley de los metales intermedios* dice que un tercer metal introducido entre dos metales distintos de una unión de termopar no tendrá efecto siempre y cuando las dos uniones estén a la misma temperatura. Esta ley es importante en la construcción de uniones de termopares. Es posible hacer una unión termopar al estañar dos metales, ya que la estañadura no afectará la sensibilidad. En la práctica, las uniones termopares se realizan con soldaduras de los dos metales (por lo general con una carga capacitiva) ya que esto asegura que el desempeño no esté limitado al punto de fusión de una estañadura.

Por lo general, la temperatura de la unión fría es detectada por un segundo detector de temperatura de precisión, en buen contacto con los conectores de salida del instrumento de medición. Esta segunda lectura de temperatura, junto con la lectura del termopar es usada por el instrumento de medición para calcular la temperatura verdadera en el extremo del termopar. Para aplicaciones menos críticas, la CUF es usada por un sensor de temperatura semiconductor.

2.3.1.- Historia.

En 1822 el físico estoniano Thomas Seebeck descubrió accidentalmente que la unión entre los dos metales genera un voltaje que es función de la temperatura. Los termopares funcionan bajo este principio, el llamado *efecto Seebeck*. Si bien casi cualquier par de metales pueden ser usados para crear un termopar, se usa un cierto número debido a que producen voltajes predecibles y amplios gradientes de temperatura⁶.

2.3.2.- Efecto Seebeck.

Cuando las uniones de dos conductores se unen por sus extremos para formar un circuito, y se colocan en un gradiente de temperatura, se manifiesta un flujo de calor y un flujo de electrones conocido como corriente Seebeck. La fuerza electromotriz (FEM) que genera la

corriente se conoce como fuerza electromotriz de termopar o tensión Seebeck, el cual se muestra en la figura 2.4.

El coeficiente Seebeck (S) se define como la derivada de dicha tensión (E) con respecto a la temperatura (T).

$$S = \frac{dE}{dT}$$

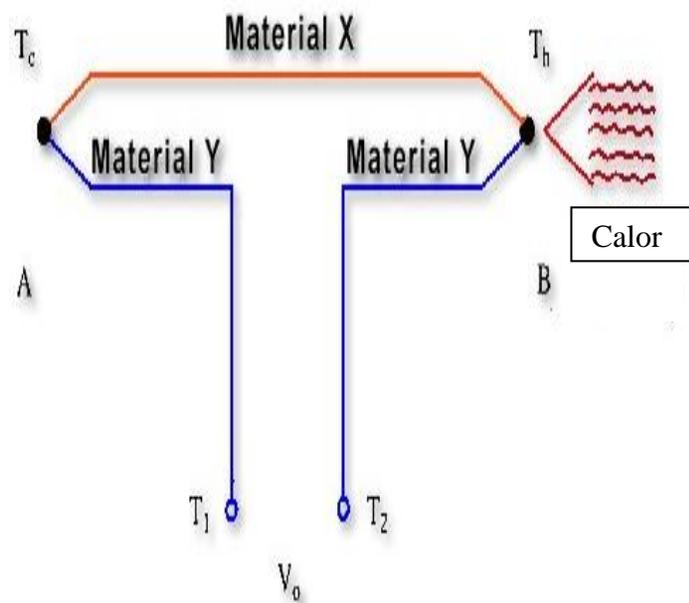


FIGURA 2.4.- Representación del efecto Seebeck.

2.3.3.- Efecto Peltier.

Descubierto por Jean C. A. Peltier en 1834, consiste en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales distintos al pasar corriente por ella. Al invertir el sentido de la corriente se invierte también el sentido del flujo de calor. Este efecto es reversible e independiente del contacto. Depende sólo de la composición y de la temperatura de la unión.

2.3.4.- Efecto Thompson.

Descubierto por William Thompson (Lord Kelvin) en 1847-1854, consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor homogéneo con temperatura no homogénea por el que circula una corriente. El calor liberado es proporcional a la corriente y por ello, cambia de signo al hacerlo el sentido de la corriente. Se absorbe calor si la corriente y el calor fluyen en direcciones opuestas y se libera calor si fluyen en la misma dirección.

Con el tiempo y el uso, la degradación del termopar es inevitable, por lo que un esquema de calibración inicial, verificaciones regulares y reemplazo eventual debe ser establecido. Si por razones prácticas la longitud de los termopares se incrementa, ésta será hecha por el empleo de la extensión correcta. El cable de extensión consiste de conductores hechos nominalmente del mismo material de los conductores del termopar. Con el fin de dar un mayor tiempo de vida del termopar, su alcance de medición debe respetarse, éste depende del grosor de los alambres (calibre AWG).

2.4 AMPLIFICADOR OPERACIONAL.

Uno de los dispositivos electrónicos de mayor uso y versatilidad en aplicaciones lineales es el amplificador operacional. El amplificador operacional es un dispositivo lineal de propósito general el cual tiene capacidad de manejo de señal desde $f=0$ Hz hasta una frecuencia definida por el fabricante; tiene además límites de señal que van desde el orden de los nV, hasta las decenas de voltio (especificación también definida por el fabricante). Los amplificadores operacionales se caracterizan por su entrada diferencial y una ganancia muy alta, generalmente mayor que 105 equivalentes a 100 dB.

El “amp-op” (terminología en inglés) es un amplificador de alta ganancia directamente acoplado, que en general se alimenta con fuentes positivas y negativas, la cual permite que

tenga excursiones tanto por arriba como por debajo tierra (o el punto de referencia que se considere). El símbolo del dispositivo se muestra en la figura 2.5.

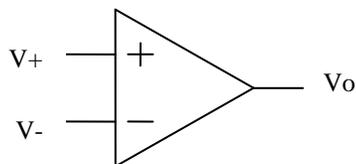


FIGURA 2.5.- Representación básica de un amplificador operacional.

El amplificador operacional se fabrica en un diminuto chip de silicio y se encapsula en una caja adecuada. Alambres finos conectan el chip con las terminales externas que salen de la cápsula de metal, plástico o cerámica⁷.

2.4.1 Configuraciones de los amplificadores operacionales.

2.4.1.1 Comparador de voltaje.

Tiene como misión comparar una tensión variable con otra, normalmente constante, denominada tensión de referencia, dándonos a la salida una tensión positiva o negativa. Se basa en hacer trabajar a saturación los amplificadores operacionales dando a la salida una tensión $\pm V_{cc}$. Existen dos tipos básicos de comparadores, el inversor y el no inversor⁷.



FIGURA 2.6.- a) Comparador inversor, b) Comparador no inversor.

En la figura 2.7, la cual nos muestra la transferencia de salida de un circuito inversor se observa que:

$$\text{Si } V_e < V_{ref} \Rightarrow V_o = +V_{sat}$$

$$\text{Si } V_e > V_{ref} \Rightarrow V_o = -V_{sat}$$

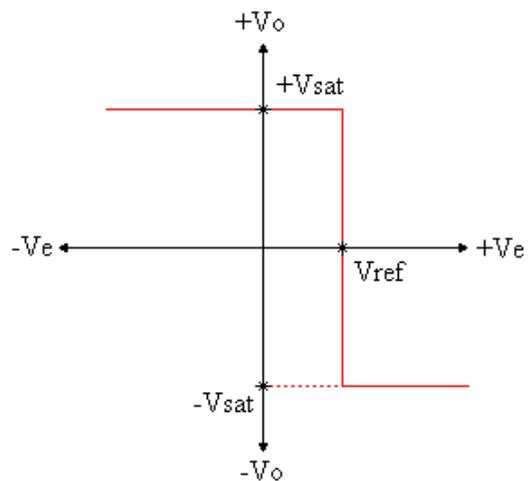


FIGURA 2.7.- Representación grafica de la salida del circuito inversor.

En la figura 2.8, la cual nos muestra la transferencia de salida de un circuito no inversor se observa que:

$$\text{Si } V_e < V_{ref} \Rightarrow V_o = -V_{sat}$$

$$\text{Si } V_e > V_{ref} \Rightarrow V_o = +V_{sat}$$

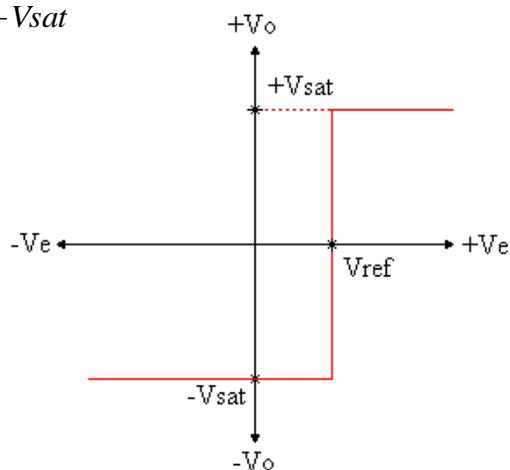
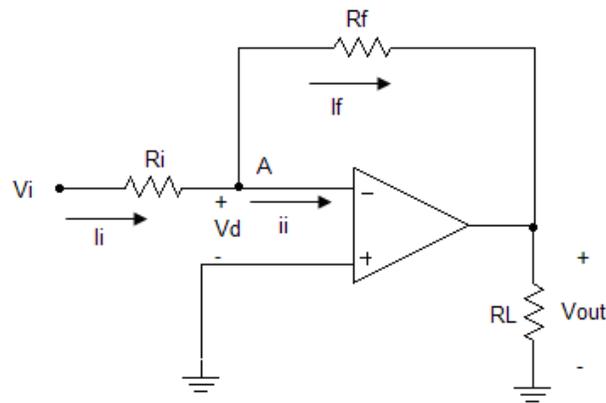


FIGURA 2.8.- Representación grafica de la salida del circuito no inversor.

2.4.1.2 Amplificador inversor.

. Esta configuración cuya ganancia está establecida por R_f y R_i , ver figura 2.9, puede amplificar señales de ca o cc. Para entender cómo funciona este circuito, se hacen dos suposiciones de simplificación.

1. El voltaje entre las entradas no inversora e inversora es esencialmente cero ($V_d = 0$).
2. La corriente requerida por las terminales de entrada no inversora e inversora es despreciable ($i = 0$).



$$V_o = -(R_f/R_i) \cdot V_i \dots\dots\dots(2.1)$$

Figura 2.9 Configuración básica del amplificador inversor.

2.4.1.3 Amplificador no inversor.

La propiedad principal de este circuito es que las señales de entrada como la de salida tienen la misma polaridad, esto significa que la señal de salida estará en fase con la señal de entrada, aunque puede ser mayor, igual o no puede ser menor, dependiendo de la ganancia que se ajuste al amplificador en lazo cerrado⁷.

La figura 2.10 nos muestra las conexiones para un amplificador no inversor. Como se observa en la figura, la señal de entrada (V_i) va conectada a la terminal positiva del amplificador operacional y la terminal negativa va hacia la retroalimentación. Como la ganancia A es infinita, si V_o es finito, el voltaje de entrada al amplificador operacional $V_+ - V_-$ debe ser cero.

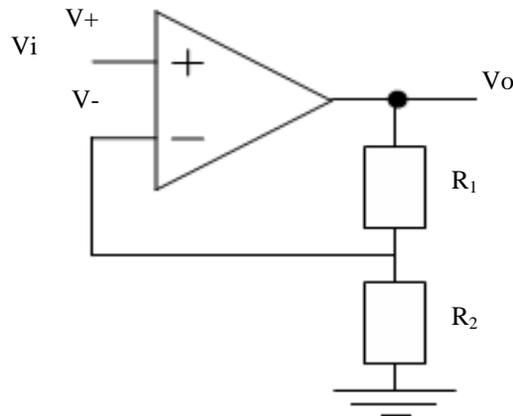


FIGURA 2.10.- Diagrama esquemático de un circuito amplificador no inversor.

$$V_o = \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) V_i \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

2.4.1.4.- Amplificador separador de ganancia unidad (seguidor de voltaje).

El seguidor de voltaje mostrado en la figura 2.11, es aquel circuito que proporciona a la salida el mismo voltaje que a la entrada, independientemente de la carga que se le acople como a la intensidad que se demande. Esta aplicación es importante en la amplificación de señales que teniendo un buen nivel de tensión son de muy baja potencia y por tanto se atenúan en el caso de conectarlas a amplificadores de mediana o baja impedancia de entrada⁷.

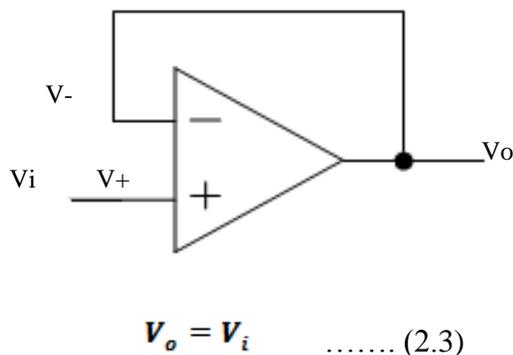


FIGURA 2.11.- Diagrama esquemático de un circuito separador de ganancia de unidad.

2.4.2.- Voltaje de Offset.

Teóricamente, si el voltaje de entrada del amplificador es cero, la salida también será cero. En la práctica no es así. Los transistores y demás componentes internos del amplificador operacional no son completamente iguales y por lo general existe un ligero error que actúa como una fuente de voltaje añadida a la entrada. Esto se denomina voltaje de entrada *offset* y se define como el pequeño voltaje que aparece a la salida del amplificador operacional cuando en la entrada se tienen 0 volts de alimentación⁸.

El voltaje de offset de entrada de la mayoría de los operacionales se encuentra por lo general en el intervalo de unos cuantos cientos de microvoltios hasta unos cuantos milivoltios. Esto puede parecer no muy importante, pero se tiene presente que se trata de un voltaje añadido a la entrada y que, por lo tanto, resulta multiplicado por la ganancia del amplificador. El voltaje *offset*, se puede reducir sus efectos mediante la sustracción de un voltaje apropiado en la entrada. La mayoría de los amplificadores operacionales proporcionan conexiones para permitir que un potenciómetro externo “ajuste” el *offset* a cero.

Por desgracia, el voltaje *offset* de entrada varía con la temperatura, lo que hace imposible eliminar por completo los efectos del voltaje *offset* sólo con el ajuste manual.

2.4.3.- Voltaje Drift.

Se le llama *voltaje drift* al incremento de voltaje que presenta el amplificador operacional directamente relacionado al aumento de temperatura en el entorno. Cada amplificador operacional tiene características diferentes en incrementos de voltaje ocasionado por la variación de la temperatura. Lo más recomendable es encontrar uno que tenga la mínima variación de V/°C para así tener un menor error en los resultados.

2.5 MICROCONTROLADOR AT89S2051

2.5.1 Antecedentes

Las técnicas digitales han encontrado su camino en innumerables áreas de la tecnología, pero el área de las computadoras digitales automáticas es por mucho la más notable y extensa. En términos muy simples: una computadora es un sistema de equipo físico denominado hardware que realiza operaciones aritméticas, manipula datos o información (por lo general en forma arbitraria) y toma decisiones.

Una computadora es más rápida y más exacta que los seres humanos, pero a diferencia de éstos, se le debe proporcionar un conjunto completo de instrucciones que le dicen

exactamente que hacer en cada paso de su operación. Este conjunto de operaciones, llamado programa lo preparan una o más personas para cada trabajo que la computadora deba realizar¹.

Las funciones principales de cada unidad son;

1. UNIDAD DE ENTRADA. A través de esta unidad se alimenta un conjunto completo de instrucciones y datos al sistema de cómputo y a la unidad de memoria, para que se almacenen hasta que sea necesario. Por lo general, la información ingresa a la unidad de entrada mediante un teclado o un disco.
2. UNIDAD DE MEMORIA. La memoria almacena las instrucciones y datos recibidos de la unidad de entrada. Guarda los resultados de las operaciones aritméticas que provienen de la unidad aritmética. También proporciona información a la unidad de salida.
3. UNIDAD DE CONTROL. Esta unidad toma las instrucciones de la unidad de memoria una a la vez y las interpreta. Luego envía las señales apropiadas a todas las otras unidades para que se ejecute la instrucción específica.
4. UNIDAD LÓGICA ARITMÉTICA. Todas las operaciones aritméticas y las decisiones lógicas se realizan en esta unidad, la cual después puede enviar los resultados a la unidad de memoria para que se almacenen.
5. UNIDAD DE SALIDA. Esta unidad toma datos de la unidad de memoria e imprime, representa, o en caso contrario presenta, la información al operador (o proceso, en el caso de una computadora de control de procesos).

Las unidades de control y lógica aritmética a menudo se consideran como una unidad llamada unidad central de procesamiento (CPU). La CPU contiene toda la circuitería para buscar, cargar e interpretar instrucciones, y para controlar y ejecutar las diversas operaciones que se requieren mediante instrucciones.

Una microcomputadora es el tipo más pequeño de computadora. En general, consta de varios circuitos integrados, incluyendo un microprocesador, memoria y circuitos de interfaz de entrada-salida, junto con dispositivos de entrada-salida como el teclado, terminal de video, impresora y manejadores de disco. El microprocesador contiene, como mínimo, todos los circuitos que componen la parte de la CPU de la computadora, es decir, la unidad de control y la unidad lógica aritmética. El microprocesador, en otras palabras, es una “CPU en un chip”.

Existe un tipo de microcomputadora más especializado llamado microcontrolador que no es una computadora para uso general. Más bien, está diseñado para usarse como controlador dedicado o controlador implantado que ayuda a monitorear y controlar la operación de una máquina, una pieza de equipo o un proceso. Los microcontroladores son microcomputadoras porque usan un circuito microprocesador como la CPU, pero son mucho más pequeños que las microcomputadoras comunes porque los dispositivos de entrada-salida que normalmente usan son mucho más pequeños. De hecho, algunos de los dispositivos de entrada-salida, así como la memoria por lo general se encuentran en el mismo circuito integrado que el microprocesador. Estos microcontroladores se emplean en una gran variedad de aplicaciones de control como: control de electrodomésticos, máquinas de cajero automático, sistemas de ignición de automóviles, instrumentación electrónica y muchas más¹.

2.5.2 Características del Microcontrolador AT89S2051

El AT89S2051 de ATMEL es un microcontrolador muy poderoso, que provee soluciones muy flexibles y buena relación costo – producto. Excelente para ser usado en aplicaciones de control². En la figura 2.12 se muestra la distribución de los pines y el montaje superficial de dicho microcontrolador.

Sus características principales son:

- Presentación de 20 terminales.
- 15 líneas de entradas/salidas programables
- Memoria flash programable con 2kB de capacidad.
- Dos timers/contadores de 16 bits cada uno.
- Interfaz SPI serial.

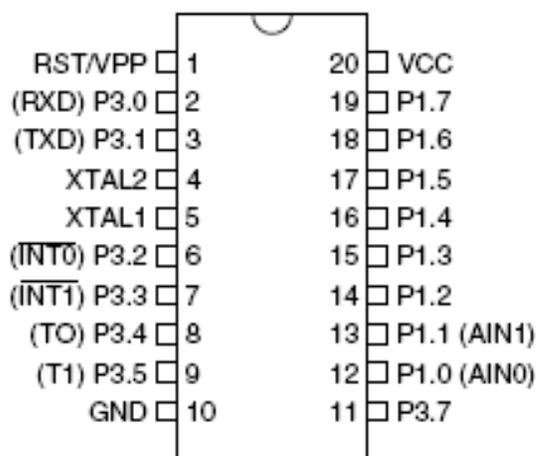


FIGURA 2.12.- Distribución de pines y presentación en montaje superficial del microcontrolador AT89S2051.

El microcontrolador AT89S2051 es un instrumento de alta eficiencia en el manejo de señales analógicas y digitales. La poca necesidad de conexiones externas lo hace un elemento sumamente fácil de adaptar a cualquier circuito.

Capítulo

3

Desarrollo del proyecto

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explicará el procedimiento realizado para la construcción del medidor de flujo másico. Toda la información recabada estableció un plan de trabajo que permitió el diseño y construcción del prototipo. Los principales aspectos involucrados en la planeación y elaboración del proyecto se mencionarán con la intención de dar un enfoque a las características que debe poseer para su óptimo desempeño.

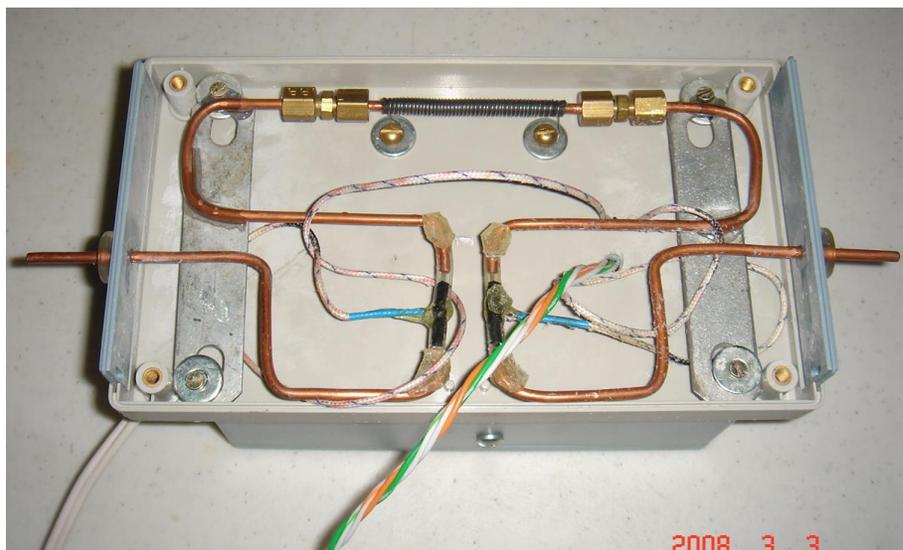
Después se explicará el sistema y posteriormente las partes que comprende la circuitería. El prototipo se construyó en dos partes, una analógica y otra digital, las cuales también se explicarán dentro de este capítulo.

3.1 ANTECEDENTES

Como se mencionó en el capítulo 1, la realización de este medidor de flujo másico tiene la finalidad de operar como un instrumento de trabajo en el laboratorio de catálisis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química del ITCM, ya que dicho laboratorio no cuenta con aparatos de este tipo.

3.2 EL MEDIDOR DE FLUJO MÁSIICO.

En la fotografía 3.1 se observa el sensor utilizado para la construcción del medidor de flujo másico:



FOTOGRAFÍA 3.1.- Sensor fabricado para medir el flujo másico de aire.

Este sensor detecta los cambios de temperatura existentes en dos puntos a los extremos del tramo de tubería por donde se hace circular un flujo de aire, al centro de la misma se encuentra un elemento conocido como resistencia calefactora, que está constituido por un enrollamiento de alambre de constantan, cuya característica es la relación de resistencia en ohms ofrecida por cada metro de alambre que se tenga. Este alambre de constantan en particular posee una relación de $4\Omega / m$. y fue ideal para la realización del mismo.

La detección de temperatura se logra utilizando unos sensores comerciales conocidos como termopares tipo k, estos termopares tienen una sensibilidad a la temperatura que se expresa en un voltaje muy pequeño (Véase Apéndice A). El termopar tipo k tiene una salida de $40\mu V$ por cada $^{\circ}C$ de temperatura que detecte, por esto es necesario utilizar elementos electrónicos de muy alta precisión cuando se quiera trabajar con estos componentes con la finalidad de ser lo mas exacto al momento de medir el flujo másico de aire que pase por la tubería.

Al inicio de la construcción de este prototipo se hizo una necesidad adquirir un equipo para la realización de pruebas al sensor y se tomó la decisión de comprar un compresor de aire, fotografía 3.2; para realizar las pruebas al dispositivo.



FOTOGRAFÍA 3.2.- Compresor de aire usado en las pruebas al prototipo.

3.3.- PROCESO GENERAL.

Para la elaboración del medidor de flujo másico, se utiliza el esquema de la figura 3.1, la cual contiene los elementos más ilustrativos de que consta el dispositivo expuesto en ésta tesis.

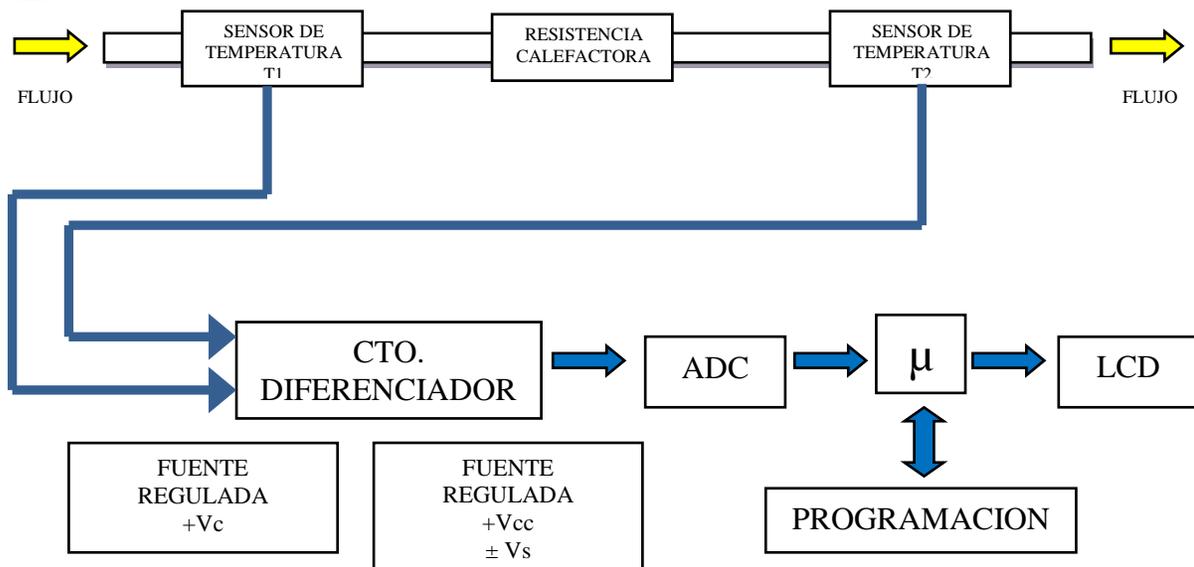


FIGURA 3.1.- Diagrama esquemático del proceso general.

Se utilizaron dos fuentes reguladas, una es la encargada de alimentar a la resistencia calefactora con un voltaje representado por $+V_c$ y otra que es la encargada de suministrar los voltajes $\pm V_s$ y $+V_{cc}$ a los demás circuitos.

Este prototipo está constituido por dos partes, una parte analógica, principalmente el sensor y las fuentes reguladas, y otra parte que es la digital, que comprende al microcontrolador, el ADC y el indicador de LCD. A continuación se explicarán a detalle estas dos partes del circuito principal, y al final se hará una explicación del funcionamiento general del medidor de flujo másico.

3.4 CIRCUITOS ANALÓGICOS.

3.4.1 Fuente de alimentación general.

La fuente de alimentación no es más que un dispositivo o subsistema que convierte la corriente alterna de la red de distribución de la energía eléctrica en otro tipo de corriente eléctrica, todo esto, diseñada para energizar algún dispositivo⁷.

El inicio del proceso interno de una fuente de alimentación es un voltaje de CA, se obtiene un voltaje de CD estable rectificando el voltaje de CA, luego se filtra a un nivel de CD y, por último, se regula para obtener el voltaje de CD fijo deseado. La regulación se obtiene, por lo general, mediante un circuito integrado regulador de voltaje que toma un voltaje CD y proporciona un voltaje de CD un poco inferior que permanece constante, aunque el voltaje de entrada varíe o la carga conectada a la salida de voltaje de CD cambie⁷.

El voltaje de CA, es por lo general de 120 Vrms y se conecta a un transformador que disminuye ese voltaje al nivel de la salida de CD deseada. Después, un rectificador de diodos proporciona un voltaje rectificado de onda completa y es filtrado inicialmente por un

condensador simple para producir un voltaje de CD. Este voltaje de CD resultante tiene, por lo general, algo de rizo o variación de voltaje de CA. Un circuito regulador puede usar esta entrada CD para proporcionar un voltaje CD que, no solo tiene mucho menos voltaje de rizo, sino que también permanece en el mismo valor de CD, aunque el voltaje de entrada varíe un poco o cambie la carga conectada al voltaje de CD de salida. Ésta regulación de voltaje se obtiene generalmente, usando un circuito integrado regulador de voltaje popular.

3.4.1.1.- Consideraciones generales.

Se necesita un circuito rectificador para convertir una señal que tenga un valor promedio cero, en otra que tenga un promedio diferente de cero. La salida resultante de un rectificador es un voltaje de CD pulsante. Este voltaje se puede aplicar, en un cargador de baterías, donde el voltaje de CD promedio es lo suficientemente grande para proporcionar una corriente de carga para batería. Para voltajes de alimentación de CD, como los usados en la radio, sistemas estéreo, computadoras, etc., el voltaje de CD pulsante de un rectificador no es lo suficientemente bueno. Se necesita un circuito de filtro para proporcionar un voltaje de CD más estable.

Otro factor importante en una fuente de alimentación, es la cantidad en que cambia el voltaje de salida sobre un rango de operación del circuito. El voltaje proporcionado en la salida bajo condiciones sin carga (sin consumo de corriente de la fuente) se reduce cuando la carga consume corriente de la alimentación (bajo carga). La cantidad en que cambia el voltaje entre las condiciones de sin carga y con carga se describe por un factor llamado regulación de voltaje.

3.4.1.2.- Diseño y construcción.

En este proyecto en particular, es necesario tener una fuente que regule tres voltajes, los cuales son: +12 V, -12 V y +5V. Estos voltajes son los encargados de energizar la parte analógica y digital del circuito principal. Para la etapa correspondiente a la resistencia

calefactora, es necesario utilizar una fuente independiente que suministre un voltaje regulado de aproximadamente 2.7V y una corriente de alrededor de 0.80A. Esto se logra utilizando un transformador independiente con relación de 127V a 12V, 60Hz con derivación central y un circuito regulador ajustable LM350 que tiene como característica principal que puede regular voltaje con un rango entre 1.2V a 33V con una corriente de salida de 3A. Fue necesaria la utilización de dos fuentes de alimentación ya que los reguladores comerciales no soportan corrientes arriba de 1A, lo cual no es conveniente para la etapa correspondiente a la resistencia calefactora. Por estos motivos se decidió adaptar dos fuentes de alimentación al circuito para que nos proporcione los voltajes utilizados en el diseño. Estas fuentes están diseñadas para funcionar conectándose a la línea de 127 Volts a 60 Hz de frecuencia disponibles.

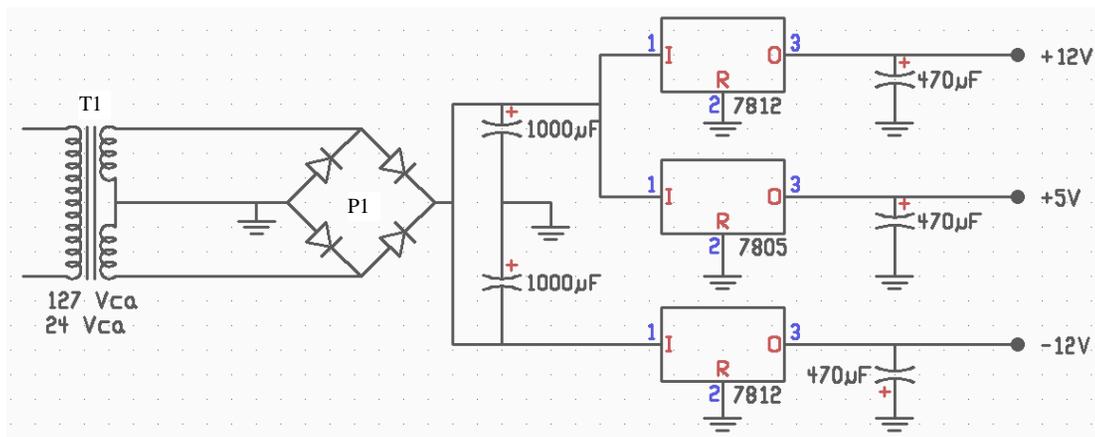


FIGURA 3.2.- Fuente de alimentación para los circuitos con operacionales y la parte digital.

Considerando las características mencionadas en el párrafo anterior y analizando el diagrama de bloques de la figura 3.1, primeramente se considera un transformador con relación de 127 Volts a 24 Volts con capacidad de 500 miliAmperes y derivación central. Se eligió el transformador (T1) con éstas características porque los 24 Volts y los miliAmperes son suficientes para energizar el circuito completo, además que su tamaño físico es adecuado para las dimensiones del prototipo. En la figura 3.2 se puede apreciar el esquema del transformador donde se muestra la forma en que se conectó la línea del devanado secundario para poder sincronizar el voltaje senoidal y el modo de conexión a las etapas posteriores de la fuente.

Partiendo del devanado secundario del transformador, se adapta un puente de diodos (P1) para poder convertir el voltaje senoidal de 24 Volts a un voltaje rectificado (Voltaje directo). Se utilizó un puente de diodos en empaquetado, siendo un componente muy económico y comercial, además que ahorra espacio en la conexión.

Adentrándose al tema de la regulación, se tiene la problemática de requerir tres valores de voltaje: +12, -12 y +5 Volts. Para obtener estos valores de voltaje a partir de los 24 Volts que entrega el transformador, se necesitan 3 tipos diferentes de reguladores. En este caso se utilizaron el 7805C para la regulación a +5 Volts, el 7812C para regulación a +12 Volts y el 7912C para regular a -12 Volts. En el caso de la regulación a +5 Volts se utilizó la misma salida de voltaje que entregaba el 7812C para reducir de aproximadamente 17 Volts ($12 * \sqrt{2}$) a 12 Volts y posteriormente, éste voltaje va conectado a la entrada del 7805C y realiza la regulación a +5 Volts. Este arreglo se hizo porque el trabajo de regular 17 Volts a 5 Volts era muy pesado para el 7805C, por lo tanto, primeramente se redujo el voltaje a 12 Volts para después regularlo a los 5 Volts previstos. Estos dispositivos son muy amigables ya que no necesitan una conexión muy compleja. Para un mejor funcionamiento de los reguladores se propone una etapa de filtrado a su entrada y otra etapa a su salida, todo esto para tener una señal con el mínimo rizado posible tanto a su entrada como a su salida.

La fuente regulada utilizada para la etapa de la resistencia calefactora es un poco diferente pues en lugar de usar un regulador de voltaje fijo, como el 7805C o el 7812C, se usa el LM350T, que es un regulador de voltaje ajustable en un rango de 1.2V a 33V, capaz de suministrar hasta 3A de corriente de salida. La figura 3.3 muestra el circuito de la fuente de alimentación de la resistencia calefactora.

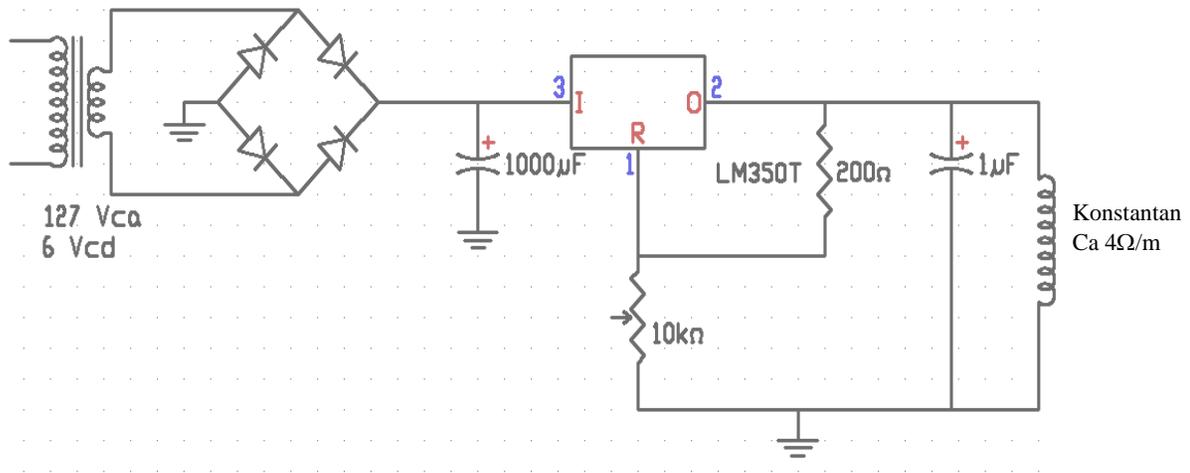


FIGURA 3.3.- Fuente de alimentación para la resistencia calefactora.

Se usó el circuito LM350T debido a que son muy fáciles de usar, pues con solo dos resistencias pueden establecer la salida de voltaje. Su configuración básica se muestra en la figura 3.4.

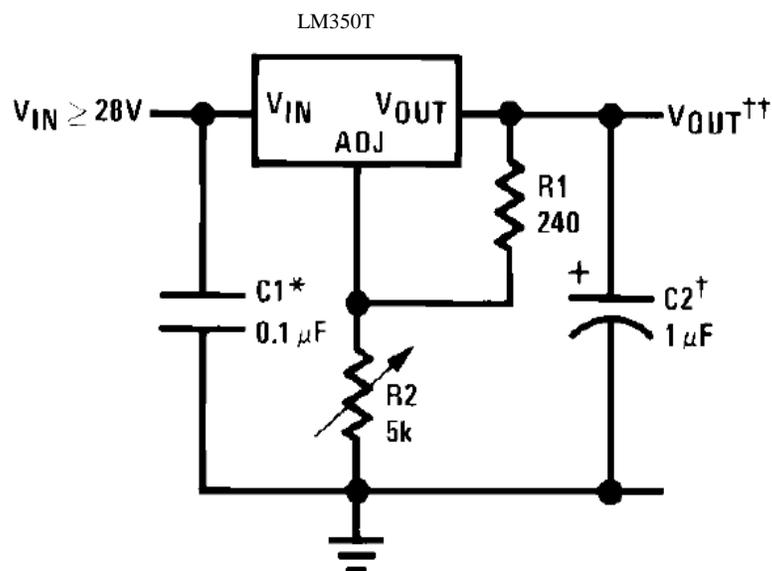


FIGURA 3.4.- Circuito básico del regulador ajustable LM350T.

3.4.2.- Circuito diferenciador.

Este circuito es una de las etapas más importantes en el desarrollo del medidor de flujo másico ya que es el encargado de detectar los cambios de temperatura indicados en el principio del tubo calentado.

La alta ganancia lineal y el bajo “drift voltage” del circuito amplificador operacional OP177, hace posible obtener un rendimiento elevado de la medición de flujo másico, al poder detectar los cambios en microvoltajes producidos por los termopares tipo k al sensar los cambios en temperatura ocurridos al calentar el aire que pasa por la etapa que comprende la resistencia calefactora. Este circuito se muestra en la figura 3.5.

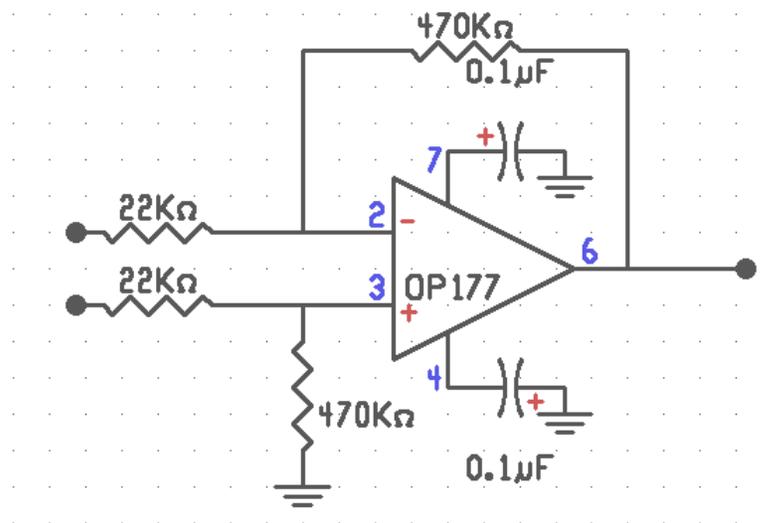


FIGURA 3.5.- Circuito amplificador diferencial usado para la detección de los cambios de temperatura.

Este circuito en particular posee una ganancia dada por la relación $470\text{K}\Omega / 22\text{K}\Omega$, es decir, este circuito posee una ganancia de 21.36363636, con lo cual se pueden observar a la salida las variaciones existentes expresadas en mili voltajes.

La entrada inversora del amplificador diferencial estará conectada al termopar que se encuentra a la entrada de flujo de aire, la entrada no inversora del amplificador diferencial estará conectada a la salida del flujo de aire, esto es con la intención de obtener a la salida una señal positiva, para un mejor manejo de la señal en la etapa digital.

3.4.3.- Circuito amplificador inversor.

Para integrar la etapa analógica del proyecto con la etapa digital, no es suficiente el mili voltaje que se tiene a la salida del circuito diferenciador, para esto se ocupa un circuito amplificador inversor, pues su relación de salida es lineal con respecto a la entrada, además se utiliza otro amplificador operacional OP177 ya que sus características son muy favorables para este proyecto. A continuación en la figura 3.6 se muestra la configuración usada en el amplificador inversor. Se debe tener cuidado al usar esta configuración pues su salida será amplificada aunque de manera invertida, esto es, se debe ajustar la conexión en las entradas del amplificador diferencial haciendo ahora que la entrada inversora del amplificador diferencial estará conectada al termopar que se encuentra a la salida de flujo de aire y la entrada no inversora del amplificador diferencial estará conectada a la entrada del flujo de aire.

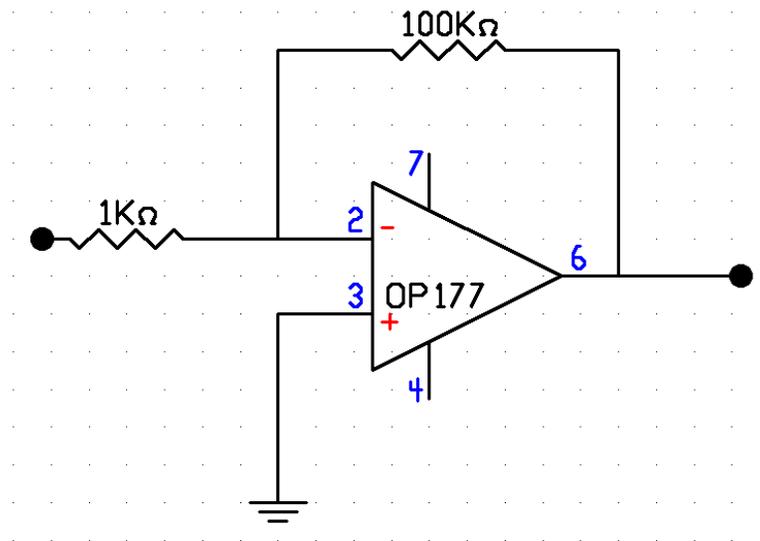


FIGURA 3.6.- Configuración básica del amplificador inversor.

En esta aplicación la ganancia que se maneja es la relación existente $100\text{K}\Omega / 1\text{K}\Omega$

3.5 CIRCUITOS DIGITALES.

3.5.1 Convertidor análogo-digital.

La conversión analógica-digital es un procedimiento a través del cual una señal analógica de tensión o de corriente unipolar o bipolar es transformada en un código digital N obtenido a partir del cociente entre la magnitud de la señal analógica de entrada y la de una referencia de tensión o de corriente. El código N correspondiente a una señal de entrada V_i puede obtenerse por:

$$N = \frac{V_i}{V_{ref}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{b_i}{2^i}, \text{ donde; } b_i \in [0,1] \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Este cociente se realiza en binario y el resultado exacto de la conversión se lograría luego de un número infinito de bits.

En los sistemas reales que realizan este procedimiento, llamados convertidores analógico-digitales (CA/D), se limita el número de bits a n por lo que se realiza la cuantificación de la señal analógica en 2^n niveles. Estos niveles se expresan en un código binario, por lo que el convertidor A/D realiza la codificación de la señal¹.

El ADC que se utilizó en este proyecto es el ADC MAX1168, el cual se muestra en las figuras 3.7 y 3.8; es un convertidor con una resolución de 16 bits, esto con la firme intención

de mostrar una medición lo más precisa posible pues como era de esperarse, las señales provenientes del sensor de flujo másico son muy pequeñas y se optó por usar un convertidor que tuviera características como las siguientes:

- Tiempo de conversión con reloj externo de $3.75\mu\text{s}$.
- Resolución de 16 bits.
- Nivel lógico ajustable de $+2.7\text{V}$ a $+5.25\text{V}$.
- Rango de voltaje de entrada: 0 a V_{REF} .
- “Offset Drift” de $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

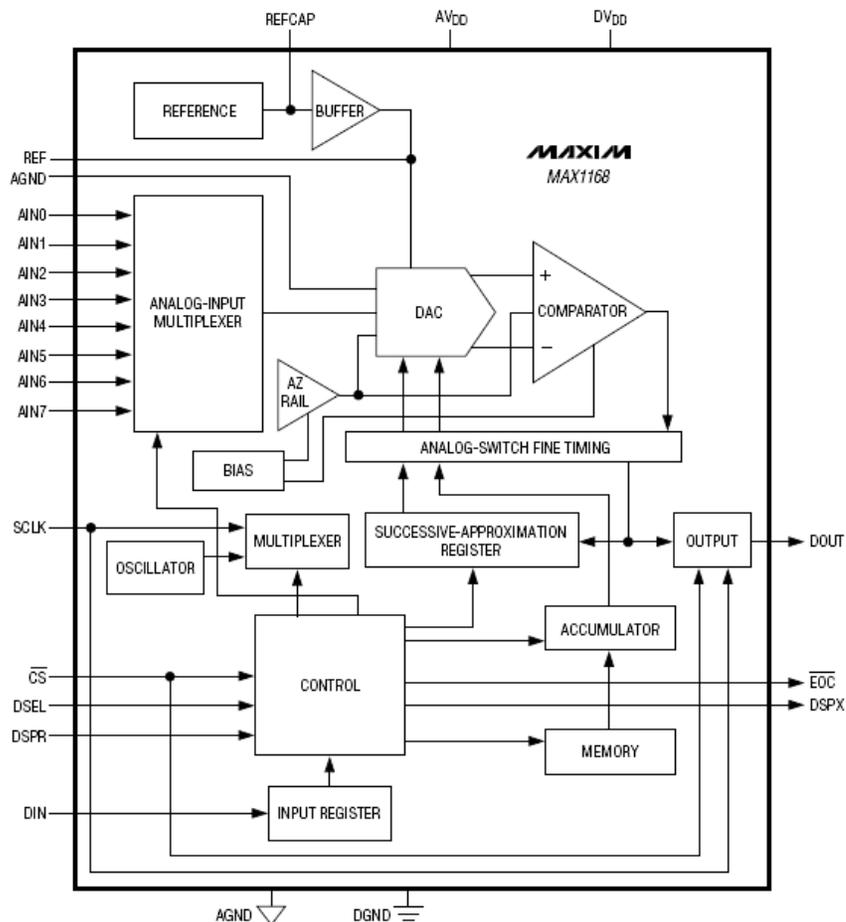


FIGURA 3.7 .- Diagrama funcional del ADC MAX1168.

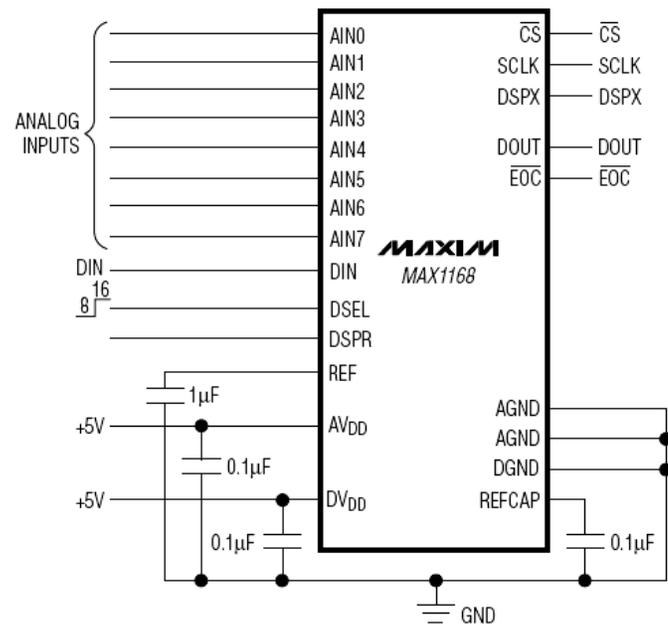


FIGURA 3.8.- Circuito de operación del ADC MAX1168.

La tarea principal del ADC en el medidor de flujo másico es leer las señales provenientes del circuito amplificador diferencial de la variable y del circuito amplificador inversor y convertirlas a señales digitales. El diagrama de conexiones del ADC al microcontrolador se muestran en la figura 3.9⁵.

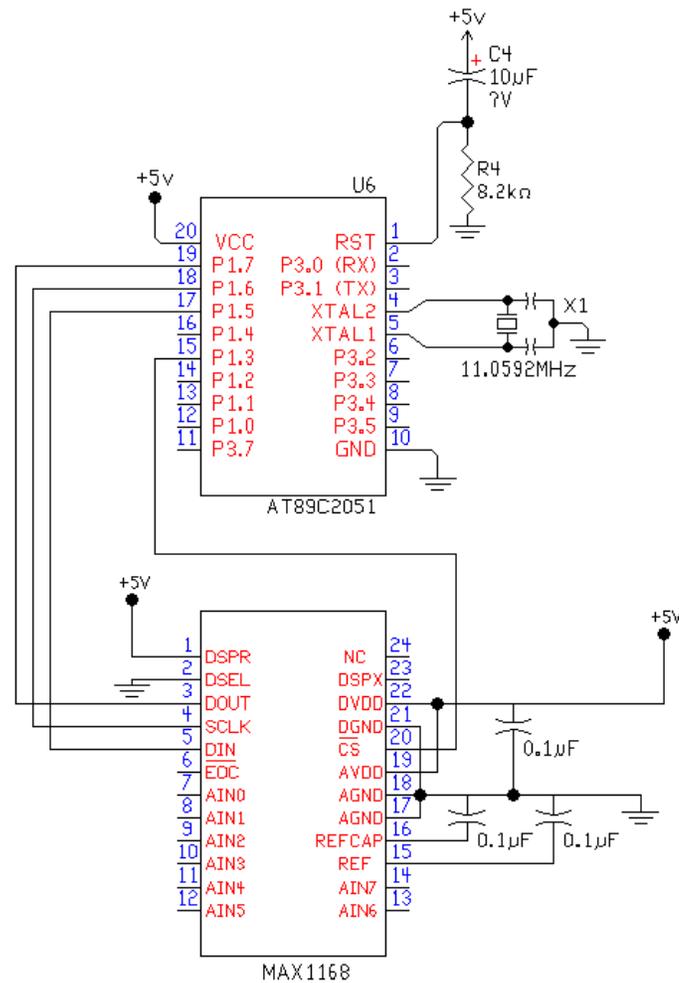


FIGURA 3.9.- Diagrama de conexiones del ADC MAX 1168 al microcontrolador.

3.5.2.- Procesos del Microcontrolador.

El microcontrolador es el encargado de vincular toda la parte analógica del sistema con la salida visual en el indicador LCD, ya que se encarga de realizar las operaciones necesarias para cumplir la función del medidor se podría definir como el “cerebro” del proyecto, él organiza todos los procesos interactuando con el exterior por medio de sus puertos de Entrada/Salida y realiza todas las operaciones aritméticas que son necesarias para cumplir el

cometido del controlador. En la figura 3.10 se muestra el diagrama del microcontrolador con las conexiones básicas para su funcionamiento:

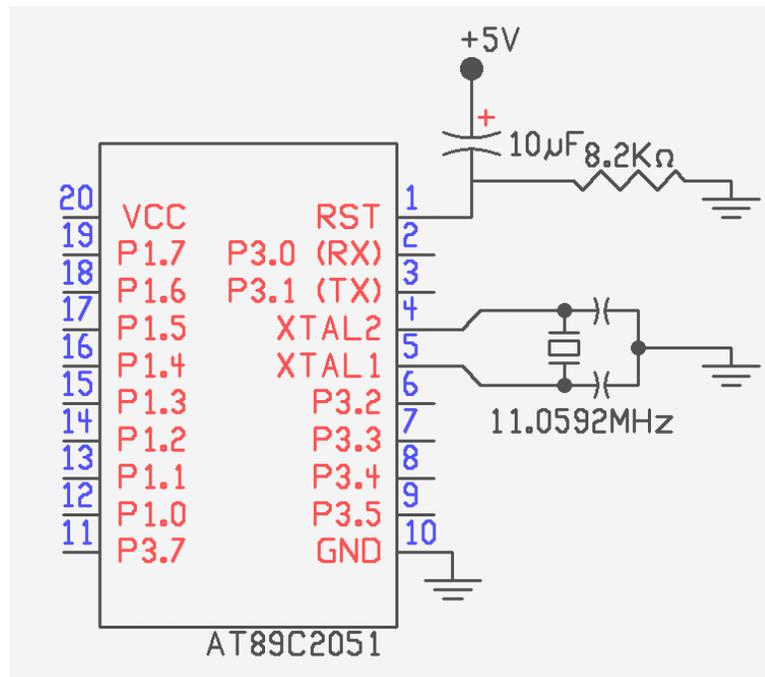


FIGURA 3.10.- Diagrama de conexiones del microcontrolador AT89C2051.

Capítulo

4

Resultados y Conclusiones

INTRODUCCIÓN.

En este último capítulo se explica cuales fueron los resultados obtenidos, se dice si fueron satisfactorios o no, y además se dan las conclusiones a las que se llegó después de haber invertido tanto tiempo en la realización de este proyecto. También se compara el proyecto con la teoría propuesta en los capítulos anteriores, junto con las experiencias y resultados ocurridos durante la elaboración de este trabajo.

Finalmente se dan las conclusiones del prototipo final, explicando las ventajas y desventajas del circuito. Esperando no dejar esta investigación hasta este punto, se analiza la posibilidad de seguir trabajando en ella en un futuro, proponiendo la idea de no solo medir el flujo másico sino además controlar la apertura y cierre de válvulas para hacer de este proceso un sistema automatizado.

4.1.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Este proyecto en general ha dado buenos resultados. Debido a que en un principio no se tenía la mínima idea de cómo realizar este diseño, fue necesario realizar numerosos intentos para conseguir un comportamiento satisfactorio del medidor. Muchos materiales fueron utilizados con la intención de definir los elementos sensores de temperatura. Se inició con bobinados de alambre de magneto, cuya resistencia cambia con la temperatura, pero no funcionó debido a problemas de falta de precisión en los elementos. Luego se utilizó el alambre que contienen las resistencias de potencia, pero debido a que era demasiado delgado no se pudo manipular adecuadamente. También se intentó alambre constantan, pero era demasiado rígido y se desechó. Finalmente se utilizaron dos elementos termopares de las mismas características y con ellos se han obtenido resultados favorables.

Los resultados obtenidos nos demuestran que en ausencia de flujo, la diferencia de potencial entre los sensores después del amplificador, es de cero; y a medida que el flujo aumenta se observa un incremento en el voltaje de salida

Además, se logró medir flujo por medio del principio del tubo calentado; utilizando elementos de fácil adquisición y a un bajo costo. Los elementos utilizados en la realización del sensor son:

- Tubo de Cobre de 1/8" \$28.00 metro
- 2 Niple Unión de 1/8" \$22.00 pieza
- 2 Termopar Tipo K \$80.00 pieza
- Alambre de Constantan \$30.00 metro

Sin contar la etapa digital, ni los elementos utilizados para su montaje y puesta en operación; los cuales tienen un monto de \$1,500 aproximadamente. Con esto se pudo

comprobar que el dispositivo es muy factible a comparación de los medidores de flujo que existen en el mercado. Por ejemplo el puro sensor con las mismas características de la marca Micro Motion su costo es de \$70,000.00 aproximadamente, sin contar el transmisor digital.

Se desarrolló un proceso con la finalidad de mostrar una medición de flujo aproximado, pues no se cuenta con un instrumento calibrado que pueda mostrar esa información para su comparación con el proyecto.

El manómetro indicador de la presión a la salida del compresor de aire ofrece una escala, que se muestra en la fotografía 4.1, que no tiene una indicación graduada por unidad de libras por pulgada cuadrada (psi por sus siglas en ingles). Se utilizo un globo, un recipiente con un nivel de agua establecido y graduado.



Fotografía 4.1.- Manómetro del compresor.

El proceso comienza ajustando la presión a la salida del compresor a una escala visible en el manómetro, después se conecta el globo al compresor y se deja pasar aire por un tiempo de 4 segundos. Después el globo inflado se sumerge en el recipiente con agua provocando un incremento de nivel, equivalente a un incremento de volumen proporcional a los 4 segundos. El volumen del recipiente está expresado en cm^3 . La equivalencia de volumen en cm^3 y mililitros es lineal por lo que el incremento de volumen se encuentra expresado en mililitros por cada 4 segundos que multiplicado por 15 nos da una relación de mililitros por minuto (ml/min). Esta relación de volumen por unidad de tiempo corresponde al flujo de aire que

proporciona el compresor a una presión predeterminada. En la tabla 4.1 se muestra esta relación para diferentes presiones.

Presión	Flujo
25 psi	960.625 ml/min
30 psi	1152.75ml/min
35 psi	1344.875 ml/min
40 psi	1537 ml/min
45 psi	1729.125 ml/min
50 psi	1921.25 ml/min.

Tabla 4.1.- Relación entre presión a la salida del compresor y flujo.

Debido a que el compresor ofrece una escala que no cuenta con intervalos por unidad de psi y que el punto más bajo de la tabla 4.1 casi equivale a 1000 ml/min, se utilizó un transmisor de presión Rosemount modelo 2088 para hacer la tabla 4.2 que muestra intervalos más pequeños de presión con respecto a la salida del transmisor. El transmisor de presión Rosemount 2088 se muestra en la fotografía 4.2.



Fotografía 4.2.- Transmisor de Presión Rosemount modelo 2088.

PSI	I(mA)	PSI	I(mA)	PSI	I(mA)
0	4.01	22	10.28	44	16.50
2	4.62	24	10.84	46	17.06
4	5.19	26	11.41	48	17.63
6	5.75	28	11.97	50	18.20
8	6.33	30	12.54		
10	6.88	32	13.10		
12	7.45	34	13.67		
14	8.01	36	14.24		
16	8.58	38	14.80		
18	9.15	40	15.37		
20	9.71	42	15.93		

Tabla 4.2.- Relación de presión con respecto a corriente de salida usando el transmisor de presión Rosemount 2088.

Con la tabla 4.2 se realizó la tabla 4.3 que muestra el voltaje a la salida del medidor de flujo a diferentes presiones.

I(mA)	Presión (psi)	Voltaje (V)
5.35	4.56	0.84
6.4	5.27	2.28
6.85	9.86	2.48
8	13.93	2.56
9.1	17.82	2.69
11.1	24.89	2.9
12.4	29.49	2.95

Tabla 4.3.- Relación entre presiones y voltaje a la salida del medidor de flujo.

Estas tablas tienen la intención de mostrar una relación por medio del voltaje del flujo aproximado que muestra el medidor.

Ha sido posible diseñar y construir un medidor de flujo másico de aire utilizando el principio del tubo calentado con elementos comunes que se pueden encontrar en la localidad, también hay que hacer mención que la circuitería utilizada y sus principios de operación y manejo son las mismas que se aprendieron en los estudios profesionales, eso quiere decir que se cuenta con las bases y herramientas necesarias para la resolución de problemas técnicos en la vida profesional.

Queda comprobado que es posible diseñar un medidor de flujo másico que utilice el principio del tubo calentado; pero debido a la falta de maquinaria y elementos especializados; no fue posible hacer un maquinado profesional que permita sensar cambios rápidos de flujo; por lo que este medidor ofrece una respuesta solamente para flujos constantes.

4.3.- TRABAJOS A FUTURO.

El proyecto elaborado y titulado: Diseño y Construcción de un Medidor de Flujo Másico utilizando el Principio del Tubo Calentado, tiene la posibilidad de continuar siendo un tema de investigación, debido a que si ya se cuenta con un dispositivo que puede detectar el flujo másico que pasa por una tubería, una investigación mas profunda podría llevar a la elaboración de un dispositivo capaz de utilizar esa medición para controlar la variable por medio de dispositivos específicos para ese tipo de trabajo, con la finalidad de automatizar ese proceso a través de algún tipo o sistema de control.

Otro trabajo a futuro sería, el desarrollar e implementar este dispositivo, por medio de maquinaria especializada, para su funcionamiento dentro de algún proceso que necesite de una medición de flujo.

Este trabajo se puede utilizar como medio didáctico para demostrar que se puede hacer una medición de flujo por medio del principio del tubo calentado.

Además del poder adecuar este medidor de flujo para que se pueda colocar en paralelo con algunas adaptaciones a tuberías mas grandes, ampliando así el rango de mediciones de flujo a las necesidades del usuario.

Apéndice

A

Tabla Termopar tipo K

INTRODUCCIÓN.

En éste apéndice se encuentran la tabla de valores del termopar tipo K. Las tablas muestran la relación que tiene el termopar tipo K entre el incremento de temperatura en grados centígrados, con el incremento de voltaje que proporciona. Ésta relación es de mucha utilidad para obtener las lecturas provenientes del sistema y posteriormente, poder ser manipulado.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-40	-1.527	-1.563	-1.600	-1.636	-1.673	-1.709	-1.745	-1.781	-1.817	-1.853
-30	-1.156	-1.193	-1.231	-1.268	-1.305	-1.342	-1.379	-1.416	-1.453	-1.490
-20	-0.777	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118
-10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739
0	-0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353
0	-0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.099	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519
260	10.560	10.600	10.641	10.682	10.723	10.764	10.805	10.846	10.887	10.928
270	10.969	11.010	11.051	11.093	11.134	11.175	11.216	11.257	11.298	11.339
280	11.381	11.422	11.463	11.504	11.546	11.587	11.628	11.669	11.711	11.752
290	11.793	11.835	11.876	11.918	11.959	12.000	12.042	12.083	12.125	12.166
300	12.207	12.249	12.290	12.332	12.373	12.415	12.456	12.498	12.539	12.581
310	12.623	12.664	12.706	12.747	12.789	12.831	12.872	12.914	12.955	12.997
320	13.039	13.080	13.122	13.164	13.205	13.247	13.289	13.331	13.372	13.414
330	13.456	13.497	13.539	13.581	13.623	13.665	13.706	13.748	13.790	13.832
340	13.874	13.915	13.957	13.999	14.041	14.083	14.125	14.167	14.208	14.250
350	14.292	14.334	14.376	14.418	14.460	14.502	14.544	14.586	14.628	14.670
360	14.712	14.754	14.796	14.838	14.880	14.922	14.964	15.006	15.048	15.090
370	15.132	15.174	15.216	15.258	15.300	15.342	15.384	15.426	15.468	15.510
380	15.552	15.594	15.636	15.679	15.721	15.763	15.805	15.847	15.889	15.931
390	15.974	16.016	16.058	16.100	16.142	16.184	16.227	16.269	16.311	16.353
400	16.395	16.438	16.480	16.522	16.564	16.607	16.649	16.691	16.733	16.776
410	16.818	16.860	16.902	16.945	16.987	17.029	17.072	17.114	17.156	17.199
420	17.241	17.283	17.326	17.368	17.410	17.453	17.495	17.537	17.580	17.622
430	17.664	17.707	17.749	17.792	17.834	17.876	17.919	17.961	18.004	18.046
440	18.088	18.131	18.173	18.216	18.258	18.301	18.343	18.385	18.428	18.470
450	18.513	18.555	18.598	18.640	18.683	18.725	18.768	18.810	18.853	18.895
460	18.938	18.980	19.023	19.065	19.108	19.150	19.193	19.235	19.278	19.320
470	19.363	19.405	19.448	19.490	19.533	19.576	19.618	19.661	19.703	19.746
480	19.788	19.831	19.873	19.916	19.959	20.001	20.044	20.086	20.129	20.172
490	20.214	20.257	20.299	20.342	20.385	20.427	20.470	20.512	20.555	20.598
500	20.640	20.683	20.725	20.768	20.811	20.853	20.896	20.938	20.981	21.024
510	21.066	21.109	21.152	21.194	21.237	21.280	21.322	21.365	21.407	21.450
520	21.493	21.535	21.578	21.621	21.663	21.706	21.749	21.791	21.834	21.876
530	21.919	21.962	22.004	22.047	22.090	22.132	22.175	22.218	22.260	22.303
540	22.346	22.388	22.431	22.473	22.516	22.559	22.601	22.644	22.687	22.729
550	22.772	22.815	22.857	22.900	22.942	22.985	23.028	23.070	23.113	23.156
560	23.198	23.241	23.284	23.326	23.369	23.411	23.454	23.497	23.539	23.582
570	23.624	23.667	23.710	23.752	23.795	23.837	23.880	23.923	23.965	24.008
580	24.050	24.093	24.136	24.178	24.221	24.263	24.306	24.348	24.391	24.434
590	24.476	24.519	24.561	24.604	24.646	24.689	24.731	24.774	24.817	24.859

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
600	24.902	24.944	24.987	25.029	25.072	25.114	25.157	25.199	25.242	25.284
610	25.327	25.369	25.412	25.454	25.497	25.539	25.582	25.624	25.666	25.709
620	25.751	25.794	25.836	25.879	25.921	25.964	26.006	26.048	26.091	26.133
630	26.176	26.218	26.260	26.303	26.345	26.387	26.430	26.472	26.515	26.557
640	26.599	26.642	26.684	26.726	26.769	26.811	26.853	26.896	26.938	26.980
650	27.022	27.065	27.107	27.149	27.192	27.234	27.276	27.318	27.361	27.403
660	27.445	27.487	27.529	27.572	27.614	27.656	27.698	27.740	27.783	27.825
670	27.867	27.909	27.951	27.993	28.035	28.078	28.120	28.162	28.204	28.246
680	28.288	28.330	28.372	28.414	28.456	28.498	28.540	28.583	28.625	28.667
690	28.709	28.751	28.793	28.835	28.877	28.919	28.961	29.002	29.044	29.086
700	29.128	29.170	29.212	29.254	29.296	29.338	29.380	29.422	29.464	29.505
710	29.547	29.589	29.631	29.673	29.715	29.756	29.798	29.840	29.882	29.924
720	29.965	30.007	30.049	30.091	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341
730	30.383	30.424	30.466	30.508	30.549	30.591	30.632	30.674	30.716	30.757
740	30.799	30.840	30.882	30.924	30.965	31.007	31.048	31.090	31.131	31.173
750	31.214	31.256	31.297	31.339	31.380	31.422	31.463	31.504	31.546	31.587
760	31.629	31.670	31.712	31.753	31.794	31.836	31.877	31.918	31.960	32.001
770	32.042	32.084	32.125	32.166	32.207	32.249	32.290	32.331	32.372	32.414
780	32.455	32.496	32.537	32.578	32.619	32.661	32.702	32.743	32.784	32.825
790	32.866	32.907	32.948	32.990	33.031	33.072	33.113	33.154	33.195	33.236
800	33.277	33.318	33.359	33.400	33.441	33.482	33.523	33.564	33.604	33.645
810	33.686	33.727	33.768	33.809	33.850	33.891	33.931	33.972	34.013	34.054
820	34.095	34.136	34.176	34.217	34.258	34.299	34.339	34.380	34.421	34.461
830	34.502	34.543	34.583	34.624	34.665	34.705	34.746	34.787	34.827	34.868
840	34.909	34.949	34.990	35.030	35.071	35.111	35.152	35.192	35.233	35.273
850	35.314	35.354	35.395	35.435	35.476	35.516	35.557	35.597	35.637	35.678
860	35.718	35.758	35.799	35.839	35.880	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.483
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.684	36.724	36.764	36.804	36.844	36.885
890	36.925	36.965	37.005	37.045	37.085	37.125	37.165	37.205	37.245	37.285
900	37.325	37.365	37.405	37.445	37.484	37.524	37.564	37.604	37.644	37.684
910	37.724	37.764	37.803	37.843	37.883	37.923	37.963	38.002	38.042	38.082
920	38.122	38.162	38.201	38.241	38.281	38.320	38.360	38.400	38.439	38.479
930	38.519	38.558	38.598	38.638	38.677	38.717	38.756	38.796	38.836	38.875
940	38.915	38.954	38.994	39.033	39.073	39.112	39.152	39.191	39.231	39.270
950	39.310	39.349	39.388	39.428	39.467	39.507	39.546	39.585	39.625	39.664
960	39.703	39.743	39.782	39.821	39.861	39.900	39.939	39.979	40.018	40.057
970	40.096	40.136	40.175	40.214	40.253	40.292	40.332	40.371	40.410	40.449
980	40.488	40.527	40.566	40.605	40.645	40.684	40.723	40.762	40.801	40.840
990	40.879	40.918	40.957	40.996	41.035	41.074	41.113	41.152	41.191	41.230
1000	41.269	41.308	41.347	41.385	41.424	41.463	41.502	41.541	41.580	41.619
1010	41.657	41.696	41.735	41.774	41.813	41.851	41.890	41.929	41.968	42.006
1020	42.045	42.084	42.123	42.161	42.200	42.239	42.277	42.316	42.355	42.393
1030	42.432	42.470	42.509	42.548	42.586	42.625	42.663	42.702	42.740	42.779
1040	42.817	42.856	42.894	42.933	42.971	43.010	43.048	43.087	43.125	43.164
1050	43.202	43.240	43.279	43.317	43.356	43.394	43.432	43.471	43.509	43.547
1060	43.585	43.624	43.662	43.700	43.739	43.777	43.815	43.853	43.891	43.930
1070	43.968	44.006	44.044	44.082	44.121	44.159	44.197	44.235	44.273	44.311
1080	44.349	44.387	44.425	44.463	44.501	44.539	44.577	44.615	44.653	44.691
1090	44.729	44.767	44.805	44.843	44.881	44.919	44.957	44.995	45.033	45.070
1100	45.108	45.146	45.184	45.222	45.260	45.297	45.335	45.373	45.411	45.448
1110	45.486	45.524	45.561	45.599	45.637	45.675	45.712	45.750	45.787	45.825
1120	45.863	45.900	45.938	45.975	46.013	46.050	46.088	46.126	46.163	46.201
1130	46.238	46.275	46.313	46.350	46.388	46.425	46.463	46.500	46.537	46.575
1140	46.612	46.649	46.687	46.724	46.761	46.799	46.836	46.873	46.910	46.948
1150	46.985	47.022	47.059	47.096	47.134	47.171	47.208	47.245	47.282	47.319
1160	47.356	47.393	47.430	47.468	47.505	47.542	47.579	47.616	47.652	47.689
1170	47.726	47.763	47.800	47.837	47.874	47.911	47.948	47.985	48.021	48.058
1180	48.095	48.132	48.169	48.205	48.242	48.279	48.316	48.352	48.389	48.426
1190	48.462	48.499	48.536	48.572	48.609	48.645	48.682	48.718	48.755	48.792

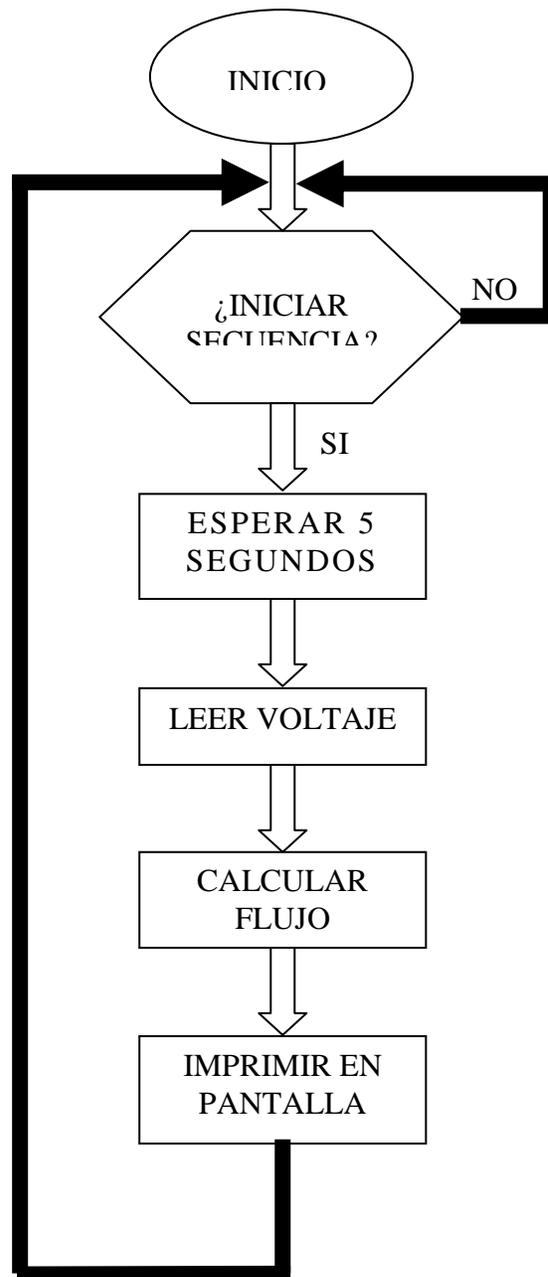
Apéndice

B

Programa implementado

INTRODUCCIÓN.

A continuación se muestra el programa utilizado para poder realizar el medidor de flujo másico realizado en lenguaje ensamblador.



```

;*****
;*           Programa de prueba para monitoreo de voltaje           *
;*****
; DESCRIPCION:
;
; Se maneja un convertidor análogo/digital MAX1168 y un display LCD
alfanumerico
; de 2 lineas por 16 caracteres. Se monitorea el canal 0 del ADC y se
despliega
; el resultado de la conversion en el display de manera ciclica.
;
; Microcontrolador: AT89C2051.
;
; ++++++
;           D E C L A R A C I O N E S
; ++++++
;
; CON'S:
; . . . . .
; VAR'S (RAM INTERNA)

```

CONVH	EQU	20H	
CONVL	EQU	21H	
COUNT	EQU	22H	
LECTURA	EQU		23H
DATO	EQU	24H	
SUMA1	EQU	25H	
SUMA2	EQU	26H	
SUMA3	EQU	27H	
REGLON	EQU		28H
COLUMNA	EQU		29H

INICIO EQU 33H

; banderas varias:

```

;*****
; I/O's:

CS           BIT P1.0    ; A1 DAC
SCLK        BIT P1.1    ; A1 DAC

```

```

DIN          BIT P1.2    ; A1 DAC
DOUT         BIT P1.3    ; A1 DAC

DB4 EQU P1.4
DB5 EQU P1.5
DB6 EQU P1.6
DB7 EQU P1.7
EN EQU P3.4
RS EQU P3.2
RW EQU P3.3
DATA EQU P1
DA_LINE EQU P3.5
OE_LINE EQU P3.7

;*****
;
; RESET                      ; reset del uC
;
;                               ;
;   ORG 0H                      ; localiza rutina en 00H
;   jmp START                    ; salta a START
;
;*****
;
;                               S U B R U T I N A S
;
;*****
;                               establece registros de control
INITIALIZE:
;
;                               ;
;   mov SP,#64H                  ; Apuntador de stack a 100d
;   mov PSW,#00H                 ;
;
;   setb CS                      ; Lineas del ADC
;   clr SCLK
;   clr DIN
;
;   setb OE_LINE
;
;   RET                          ;

;*****
;                               Retardo de 999.348 microsegundos
;Con un cristal de 11.0592MHz un ciclo de maquina dura 1.0850694
microsegundos
;por lo tanto:
; (2) + (1) + 3*(255) + 1 + 3*(50) + 2 = 921 ciclos
DELAYMS:
;
;                               ; (2 ciclos) de "call"

```

```

MOV    R7,#00H           ;pone el valor de 0 en registro R7  (1
ciclo)
LOOPX:                    ;
    INC    R7             ;incrementa R7 en 1 (R7 = R7 +1)      (1
ciclo)
    CJNE   R7,#0FFH,LOOPX ;compara A con FF hexa.           (2
ciclos)
    mov R7,#00H           ; (1 ciclo)
LOOPY:                    ;
    inc R7                ; (1 ciclo)
    cjne R7,#50,LOOPY     ; (2 ciclos)
    ret                  ;regresar (2 ciclos)

;*****

;                               Retardo de 501.094 mS
; (5 ciclos) + 2*( 250*(1 mS + 2 ciclos) + (2 ciclos)) = 501.094 mS
DELAYHS:                    ;                               (2 ciclos) de "call"
    mov R5,#2             ; R5 = 2                       (1 ciclo)
LOOPCX:                    ;
    mov R6,#250           ; R6 = 250           (1 ciclo)
LOOPBX:                    ;
    call DELAYMS          ; retado de 1 mS   (1 mS)
    djnz R6,LOOPBX        ; R6 = R6 - 1     (2 ciclos)
    djnz R5,LOOPCX        ; R5 = R5 - 1     (2 ciclos)
    ret                  ;                               (2 ciclos)

;*****

;                               Retardo de 100 mS aproximadamente
; (3 ciclos) + 100*(1 mS + 2 ciclos) = 100.220 mS
DELAY100MS:                ;                               (2 ciclos) de "call"
    mov R6,#100           ; R6 = 100         (1 ciclo)
LOOPM:                    ;
    call DELAYMS          ; retado de 1 mS   (1 mS)
    djnz R6,LOOPM        ; R6 = R6 - 1     (2 ciclos)
    ret                  ;                               (2 ciclos)

;*****

; Comunicacion con ADC:
MAX1168:

    clr    CONVH
    clr    CONVL

;    mov    DATO,#00H      ; Command/Configuration/Control Register

```

```

        clr     CS

        nop

        mov     COUNT,#8           ; 8 Bits del registro de
comando/conf./control

NBIT:
        jnb    DATO.7,ZERO

        setb   DIN

        jmp    PULSE

ZERO:
        clr    DIN

PULSE:
        setb   SCLK

        nop
        nop

        clr    SCLK

        mov    A,DATO
        rl    A
        mov    DATO,A

        djnz   COUNT,NBIT
;*****

        mov    COUNT,#8           ; 8 bits resultado de la conversion (H)

NBIT2:
        jnb    DOUT,OZERO

        setb   CON VH.0

        jmp    PULSE2

OZERO:
        clr    CON VH.0

PULSE2:
        setb   SCLK

        nop
        nop

        clr    SCLK

        mov    A,CON VH
        rl    A
        mov    CON VH,A

```

```

    djnz    COUNT,NBIT2

    mov     A,CONVH
    rr     A
    mov     CONVH,A

;*****

    mov     COUNT,#8      ; 8 bits resultado de la conversion (H)
NBIT3:
    jnb     DOUT,OZERO2
    setb    CONVL.0
    jmp     PULSE3
OZERO2:
    clr     CONVL.0
PULSE3:
    setb    SCLK

    nop
    nop

    clr     SCLK

    mov     A,CONVL
    rl     A
    mov     CONVL,A

    djnz    COUNT,NBIT3

    mov     A,CONVL
    rr     A
    mov     CONVL,A

    setb    CS

    ret

;-----

; Toma 8 lecturas del canal especificado y devuelve el promedio en
CONVH:CONVL

MAX1168PROM:

    mov     SUMA1,#00H

```

```

        mov     SUMA2,#00H
        mov     SUMA3,#00H

        mov     LECTURA,#8

SUMA:
        call    MAX1168
;
;   mov     A,CONVH
;   call    TRANSMITE
;
;   mov     A,CONVL
;   call    TRANSMITE

        mov     A,CONVL
        add     A,SUMA1

        mov     SUMA1,A

        mov     A,CONVH
        addc    A,SUMA2

        mov     SUMA2,A

        mov     A,#00H
        addc    A,SUMA3

        mov     SUMA3,A

        djnz    LECTURA,SUMA

;*****

        mov     A,SUMA1
        rr     A
        rr     A
        rr     A
        mov     SUMA1,A

        mov     A,SUMA2

        jb     ACC.0,M1

        clr     SUMA1.5

        jmp     LAB1

M1:
        setb    SUMA1.5

LAB1:

        jb     ACC.1,M2

        clr     SUMA1.6

```

```
        jmp     LAB2
M2:     setb    SUMA1.6
LAB2:
        jb     ACC.2,M3
        clr    SUMA1.7
        jmp    LAB3
M3:     setb    SUMA1.7
LAB3:
        mov    A,SUMA2
        rr    A
        rr    A
        rr    A
        mov    SUMA2,A
        mov    A,SUMA3
        jb     ACC.0,M4
        clr    SUMA2.5
        jmp    LAB4
M4:     setb    SUMA2.5
LAB4:
        jb     ACC.1,M5
        clr    SUMA2.6
        jmp    LAB5
M5:     setb    SUMA2.6
LAB5:
        jb     ACC.2,M6
        clr    SUMA2.7
        jmp    LAB6
M6:     setb    SUMA2.7
```

LAB6:

```

    mov    CONVL,SUMA1

    mov    CONVH,SUMA2

    ret

```

;*****

; Lectura del display

READ_2_NIBBLES:

```

    orl    DATA,#0F0H    ;Be sure to release datalines (set outputlatches
                        ;to '1') so we can read the LCD

    setb  EN
    mov   A,DATA          ;Read first part of the return value (high nibble)
    clr   EN
    anl   A,#0F0h        ;Only high nibble is usable
    push ACC
    setb  EN
    mov   A,DATA          ;Read second part of the return value (low nibble)
    clr   EN
    anl   A,#0F0h        ;Only high nibble is usable
    swap A                ;Last received is actually low nibble, so put it in
place
    mov   R7,A
    pop   ACC
    orl   A,R7           ;And combine it with low nibble
    ret

```

;*****

; Escritura al display

WRITE_2_NIBBLES:

```

    push ACC              ;Save A for low nibble
    orl   DATA,#0F0h    ;Bits 4..7 <- 1
    orl   A,#0Fh         ;Don't affect bits 0-3
    anl   DATA,A        ;High nibble to display
    setb  EN
    clr   EN
    pop   ACC            ;Prepare to send
    swap A               ;...second nibble
    orl   DATA,#0F0h    ; Bits 4...7 <- 1
    orl   A,#0Fh         ; Don't affect bits 0...3
    anl   DATA,A        ;Low nibble to display
    setb  EN

```

```

clr    EN
ret

;*****

; chequeando el estado del LCD

WAIT_LCD:
CLR RS           ;It's a command
SETB RW         ;It's a read command
call READ_2_NIBBLES ;Take two nibbles from LCD in A
JB ACC.7,WAIT_LCD ;If bit 7 high, LCD still busy
CLR RW         ;Turn off RW for future commands
RET

;*****

;inicializando el LCD:

INIT_LCD:
CLR  RS
CLR  RW
CLR  EN
SETB EN
mov  DATA,#28h
CLR  EN
call WAIT_LCD
mov  A,#28h
call WRITE_2_NIBBLES
call WAIT_LCD
mov  A,#0Eh
call WRITE_2_NIBBLES
call WAIT_LCD
mov  A,#06h
call WRITE_2_NIBBLES
call WAIT_LCD
RET

;*****

;limpiando el DISPLAY
CLEAR_LCD:
CLR  RS
mov  A,#01h
call WRITE_2_NIBBLES ;Write A as two separate nibbles to LCD
call WAIT_LCD
RET

```

```

;*****

;escribiendo en el LCD
WRITE_TEXT:
    SETB  RS
    call WRITE_2_NIBBLES
    call WAIT_LCD
    RET

;*****

; Posiciona el cursor
LOC_DISP:
    mov    A,REGLON
    rr     A
    rr     A
    orl    A,COLUMNA
    setb   ACC.7

    clr    RS
    call   WRITE_2_NIBBLES
    call   WAIT_LCD

    ret

;*****

; Envia por puerto serie una cadena en ROM terminada en "$". En DPTR la
; direccion inicial de la cadena. (No envia "$")
PRINT_CHAIN:
    clr    A                ; SE INDEXA CON ACC
MANDA2:
    push   ACC

    movc   A,@A+DPTR        ; LEE UN CARACTER DE LA CADENA
    cjne   A,#'$',OK2      ; SI ES EL FIN SALE
    pop    ACC
    jmp    SALE2

OK2:
    call   WRITE_TEXT

    pop    ACC
    inc    A

    jmp    MANDA2

SALE2:
    ; TERMINO DE IMPRIMIR CADENA
    ret

;*****
;*
```

```

;*          P R O G R A M A   P R I N C I P A L          *
;*
;*****
;

START:          ; programa principal (al encender, inicia
en este punto)
                call INITIALIZE          ; establece registros de control,
configura P.S.

;*****

MAIN_LOOP:

                mov     DATO,#00H          ; Obtiene conversion del ADC
                call   MAX1168PROM

                mov     COLUMNNA,#00H
                mov     RENGLON,#00H

                call   LOC_DISP

                mov     DPTR,#T_VOLTAJE   ; "Voltaje"
                call   PRINT_CHAIN

                mov     A,CONVH
                call   WRITE_TEXT

                mov     A,CONVL
                call   WRITE_TEXT

                call   DELAYHS

                jmp     MAIN_LOOP

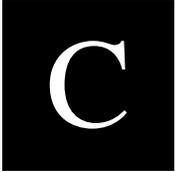
;*****

HEXAS:         DB     '0123456789ABCDEF$'
T_VOLTAJE:     DB     'Voltaje:          $'

END            ;fin de programa

```

Apéndice

A black square containing a white, serif capital letter 'C'.

Hojas de datos

INTRODUCCIÓN.

En este apéndice aparecen los datos más significativos las hojas de datos de los circuitos que se usaron en la construcción del proyecto, con el propósito de tener una consulta a la mano de los elementos electrónicos que formaron parte del mismo. Si se desea conocer más sobre estos circuitos, consultar las páginas de los fabricantes, las cuales se encuentran especificadas en las referencias de esta tesis.



Ultraprecision Operational Amplifier

OP177

FEATURES

- Ultralow offset voltage
 - $T_A = 25^\circ\text{C}$, 25 μV maximum
- Outstanding offset voltage drift 0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum
- Excellent open-loop gain and gain linearity
 - 12 $\text{V}/\mu\text{V}$ typical
- CMRR: 130 dB minimum
- PSRR: 115 dB minimum
- Low supply current 2.0 mA maximum
- Fits industry-standard precision op amp sockets

GENERAL DESCRIPTION

The OP177 features one of the highest precision performance of any op amp currently available. Offset voltage of the OP177 is only 25 μV maximum at room temperature. The ultralow V_{os} of the OP177 combines with its exceptional offset voltage drift (TCV_{os}) of 0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum to eliminate the need for external V_{os} adjustment and increases system accuracy over temperature.

The OP177 open-loop gain of 12 $\text{V}/\mu\text{V}$ is maintained over the full $\pm 10\text{ V}$ output range. CMRR of 130 dB minimum, PSRR of 120 dB minimum, and maximum supply current of 2 mA are just a few examples of the excellent performance of this

operational amplifier. The combination of outstanding specifications of the OP177 ensures accurate performance in high closed-loop gain applications.

This low noise, bipolar input op amp is also a cost effective alternative to chopper-stabilized amplifiers. The OP177 provides chopper-type performance without the usual problems of high noise, low frequency chopper spikes, large physical size, limited common-mode input voltage range, and bulky external storage capacitors.

The OP177 is offered in the -40°C to $+85^\circ\text{C}$ extended industrial temperature ranges. This product is available in 8-lead PDIP, as well as the space saving 8-lead SOIC.

PIN CONFIGURATION

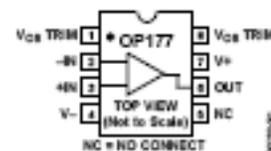
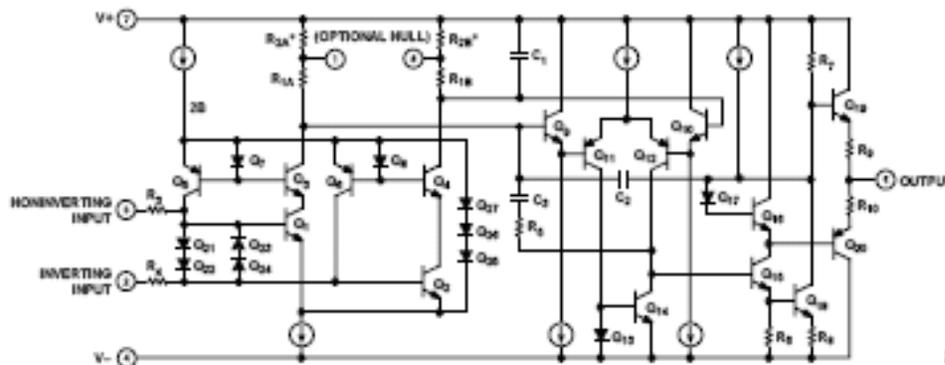


Figure 1. 8-Lead PDIP (P-Suffix), 8-Lead SOIC (S-Suffix)

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



* R_{28} and R_{29} ARE ELECTRONICALLY ADJUSTED ON CHIP AT FACTORY.

Figure 2. Simplified Schematic

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Symbol	Conditions	OP177F			OP177G			Unit	
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
INPUT OFFSET VOLTAGE	V_{OS}			10	25		20	60	μV	
LONG-TERM INPUT OFFSET ¹ Voltage Stability	$\Delta V_{OS}/\text{time}$			0.3			0.4		$\mu\text{V}/\text{mo}$	
INPUT OFFSET CURRENT	I_{OS}			0.3	1.5		0.3	2.8	nA	
INPUT BIAS CURRENT	I_B		-0.2	+1.2	+2	-0.2	+1.2	+2.8	nA	
INPUT NOISE VOLTAGE	e_n	$f_c = 1\text{ Hz to }100\text{ Hz}^2$		118	150		118	150	nV rms	
INPUT NOISE CURRENT	i_n	$f_c = 1\text{ Hz to }100\text{ Hz}^2$		3	8		3	8	pA rms	
INPUT RESISTANCE Differential Mode ³	R_{in}		26	45		18.5	45		M Ω	
INPUT RESISTANCE COMMON MODE	R_{inCM}			200			200		G Ω	
INPUT VOLTAGE RANGE ⁴	V_{IR}		± 13	± 14		± 13	± 14		V	
COMMON-MODE REJECTION RATIO	CMRR	$V_{CM} = \pm 13\text{ V}$	130	140		115	140		dB	
POWER SUPPLY REJECTION RATIO	PSRR	$V_S = \pm 3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$	115	125		110	120		dB	
LARGE SIGNAL VOLTAGE GAIN	A_{VOL}	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $V_O = \pm 10\text{ V}^5$	5000	12,000		2000	6000		V/mV	
OUTPUT VOLTAGE SWING	V_O	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	± 13.5	± 14.0		± 13.5	± 14.0		V	
		$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	± 12.5	± 13.0		± 12.5	± 13.0		V	
		$R_L \geq 1\text{ k}\Omega$	± 12.0	± 12.5		± 12.0	± 12.5		V	
SLEW RATE ²	SR	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	0.1	0.3		0.1	0.3		V/ μs	
CLOSED-LOOP BANDWIDTH ²	BW	$A_{VOL} = 1$	0.4	0.6		0.4	0.6		MHz	
OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE	R_O			60			60		Ω	
POWER CONSUMPTION	P_D	$V_S = \pm 15\text{ V}$, no load		50	60		50	60		mW
		$V_S = \pm 3\text{ V}$, no load		3.5	4.5		3.5	4.5		mW
SUPPLY CURRENT	I_S	$V_S = \pm 15\text{ V}$, no load		1.6	2		1.6	2		mA
OFFSET ADJUSTMENT RANGE		$R_F = 20\text{ k}\Omega$		± 3			± 3		mV	

¹ Long-term input offset voltage stability refers to the averaged trend line of V_{OS} vs. time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically less than 2.0 μV .

² Sample tested.

³ Guaranteed by design.

⁴ Guaranteed by CMRR test condition.

⁵ To ensure high open-loop gain throughout the $\pm 10\text{ V}$ output range, A_{VOL} is tested at $-10\text{ V} \leq V_O \leq 0\text{ V}$, $0\text{ V} \leq V_O \leq +10\text{ V}$, and $-10\text{ V} \leq V_O \leq +10\text{ V}$.

Parameter	Symbol	Conditions	OP177F			OP177G			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT									
Input Offset Voltage	V_{os}		15	40		20	100		μV
Average Input Offset Voltage Drift ¹	TCV_{os}		0.1	0.3		0.7	1.2		$\mu V/^{\circ}C$
Input Offset Current	I_{os}		0.5	2.2		0.5	4.5		nA
Average Input Offset Current Drift ²	TCI_{os}		1.5	40		1.5	85		$pA/^{\circ}C$
Input Bias Current	I_b		-0.2	+2.4	+4	+2.4	± 6		nA
Average Input Bias Current Drift ²	TCI_b		8	40		15	60		$pA/^{\circ}C$
Input Voltage Range ¹	I_{VR}		± 13	± 13.5		± 13	± 13.5		V
COMMON-MODE REJECTION RATIO	CMRR	$V_{CM} = \pm 13 V$	120	140		110	140		dB
POWER SUPPLY REJECTION RATIO	PSRR	$V_S = \pm 3 V$ to $\pm 18 V$	110	120		106	115		dB
LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN ¹	A_{vo}	$R_L \geq 2 k\Omega, V_O = \pm 10 V$	2000	6000		1000	4000		V/mV
OUTPUT VOLTAGE SWING	V_O	$R_L \geq 2 k\Omega$	± 12	± 13		± 12	± 13		V
POWER CONSUMPTION	P_o	$V_S = \pm 15 V$, no load	60	75		60	75		mW
SUPPLY CURRENT	I_{S1}	$V_S = \pm 15 V$, no load	20	2.5		2	2.5		mA

PRECISION HIGH GAIN DIFFERENTIAL AMPLIFIER

The high gain, gain linearity, CMRR, and low TCV_{os} of the OP177 make it possible to obtain performance not previously available in single stage, very high gain amplifier applications. See Figure 27.

For best CMR, $\frac{R1}{R2}$ must equal $\frac{R3}{R4}$

In this example, with a 10 mV differential signal, the maximum errors are listed in Table 6.

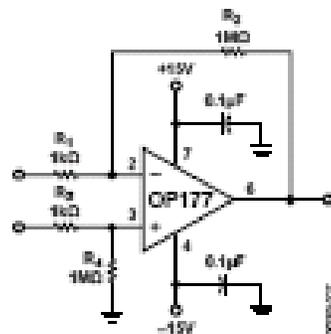


Figure 27. Precision High Gain Differential Amplifier

Table 6. High Gain Differential Amp Performance

Type	Amount
Common-Mode Voltage	0.1%/V
Gain Linearity, Worst Case	0.02%
TCV_{os}	0.0003%/ $^{\circ}C$
TCI_{os}	0.008%/ $^{\circ}C$

Features

- Compatible with MCS[®]-51 Products
- 2K Bytes of Reprogrammable Flash Memory
 - Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
- 2.7V to 6V Operating Range
- Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Two-level Program Memory Lock
- 128 x 8-bit Internal RAM
- 15 Programmable I/O Lines
- Two 16-bit Timer/Counters
- Six Interrupt Sources
- Programmable Serial UART Channel
- Direct LED Drive Outputs
- On-chip Analog Comparator
- Low-power Idle and Power-down Modes
- Green (Pb/Halide-free) Packaging Option

1. Description

The AT89C2051 is a low-voltage, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 2K bytes of Flash programmable and erasable read-only memory (PEROM). The device is manufactured using Atmel's high-density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry-standard MCS-51 instruction set. By combining a versatile 8-bit CPU with Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89C2051 is a powerful microcomputer which provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

The AT89C2051 provides the following standard features: 2K bytes of Flash, 128 bytes of RAM, 15 I/O lines, two 16-bit timer/counters, a five vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, a precision analog comparator, on-chip oscillator and clock circuitry. In addition, the AT89C2051 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port and interrupt system to continue functioning. The power-down mode saves the RAM contents but freezes the oscillator disabling all other chip functions until the next hardware reset.

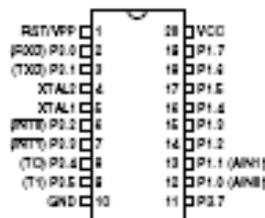


**8-bit
Microcontroller
with 2K Bytes
Flash**

AT89C2051

2. Pin Configuration

2.1 20-lead PDIP/SOIC



19-2255; Rev 0; 8/03



Multichannel, 16-Bit, 200ksp/s Analog-to-Digital Converters

MAX1167/MAX1168

General Description

The MAX1167/MAX1168 low-power, multichannel, 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) feature a successive-approximation ADC, integrated +4.096V reference, a reference buffer, an internal oscillator, automatic power-down, and a high-speed SPI™/QSPI™/MICROWIRE™-compatible interface. The MAX1167/MAX1168 operate with a single +5V analog supply and feature a separate digital supply, allowing direct interfacing with +2.7V to +6.5V digital logic.

The MAX1167/MAX1168 consume only 2.9mA ($I_{DD} = I_{DD} = +5V$) at 200ksp/s when using an external reference. AutoShutdown™ reduces the supply current to 145µA at 10ksp/s and to less than 10µA at reduced sampling rates.

The MAX1167 includes a 4-channel input multiplexer, and the MAX1168 accepts up to eight analog inputs. In addition, digital signal processor (DSP)-initiated conversions are simplified with the DSP frame-synch input and output featured in the MAX1168. The MAX1168 includes a data-bit transfer input to select between 8-bit-wide or 16-bit-wide data-transfer modes. Both devices feature a scan mode that converts each channel sequentially or one channel continuously.

Excellent dynamic performance and low power, combined with ease of use and an integrated reference, make the MAX1167/MAX1168 ideal for control and data-acquisition operations or for other applications with demanding power consumption and space requirements. The MAX1167 is available in a 16-pin QSOP package and the MAX1168 is available in a 24-pin QSOP package. Both devices are guaranteed over the commercial (0°C to +70°C) and extended (-40°C to +85°C) temperature ranges. Use the MAX1168 evaluation kit to evaluate the MAX1168.

Applications

- Motor Control
- Industrial Process Control
- Industrial I/O Modules
- Data-Acquisition Systems
- Thermocouple Measurements
- Accelerometer Measurements

Features

- 16-Bit Resolution, ±1 LSB DNL (max)
- +5V Single-Supply Operation
- Adjustable Logic Level (+2.7V to +5.25V)
- Input Voltage Range: 0 to VREF
- Internal (+4.096V) or External (+3.8V to AVDD) Reference
- Internal Track/Hold, 4MHz Input Bandwidth
- Internal or External Clock
- SPI/QSPI/MICROWIRE-Compatible Serial Interface, MAX1168 Performs DSP-Initiated Conversions
- 8-Bit-Wide or 16-Bit-Wide Data-Transfer Mode (MAX1168 Only)
- 4-Channel (MAX1167) or 8-Channel (MAX1168) Input Mux
 - Scan Mode Sequentially Converts Multiple Channels or One Channel Continuously
- Low Power
 - 2.9mA at 200ksp/s
 - 1.45mA at 100ksp/s
 - 145µA at 10ksp/s
 - 0.6µA in Full Power-Down Mode
- Small Package Size
 - 16-Pin QSOP (MAX1167)
 - 24-Pin QSOP (MAX1168)

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	INL (LSB)
MAX1167ACEE	0°C to +70°C	16 QSOP	±1.2
MAX1167BCEE	0°C to +70°C	16 QSOP	±2
MAX1167CCEE	0°C to +70°C	16 QSOP	±3
MAX1167AEEE*	-40°C to +85°C	16 QSOP	±1.2
MAX1167BEEE*	-40°C to +85°C	16 QSOP	±2
MAX1167CEEE*	-40°C to +85°C	16 QSOP	±3

*Future product—contact factory for availability.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

VDD to AGND	-0.3V to +6V	Continuous Power Dissipation (TA = +70°C)	
DVDD to DGND	-0.3V to +6V	16-Pin QSPI (derate 5.3mW/°C above +70°C)	667mW
DGND to AGND	-0.3V to +0.3V	24-Pin QSPI (derate 9.5mW/°C above +70°C)	762mW
AIN _{REF} , REF _{CP} to AGND	-0.3V to (AVDD + 0.3V)	Operating Temperature Ranges	
SCLK, CS, DSEL, DSPR, DIN to DGND	-0.3V to +6V	MAX116 _{_CE}	0°C to +70°C
DOUT, DSRX, EOC to DGND	-0.3V to (DVDD + 0.3V)	MAX116 _{_EE}	-40°C to +85°C
Maximum Current into Any Pin	50mA	Maximum Junction Temperature	+150°C
		Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
		Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(AVDD = DVDD = +4.75V to +5.25V, f_{CLOCK} = 4.8MHz external clock (50% duty cycle), 24 clocks/conversion (200ksps), external V_{REF} = +4.096V, TA = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted. Typical values are at TA = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
DC ACCURACY (Note 1)							
Resolution			16			Bits	
Relative Accuracy (Note 2)	INL	MAX116 _{_A}	±1.5		±2	LSB	
		MAX116 _{_B}	±2.0		±3		
		MAX116 _{_C}	±3.0		±6		
Differential Nonlinearity	DNL	MAX116 _{_A} (16 bit, no missing codes over temperature)			±1	LSB	
		MAX116 _{_B} (16 bit, no missing codes over temperature)			+1.75 -1.0		
		MAX116 _{_C} (16 bit, no missing codes over temperature)			±2		
Transition Noise	RMS noise	External reference			0.7	LSB _{rms}	
		Internal reference			0.8		
Offset Error			±0.1		±10	mV	
Gain Error		(Note 3)	±0.01		±0.2	%FSR	
Offset Drift					1	ppm/°C	
Gain Drift		(Note 3)			±1.2	ppm/°C	
DYNAMIC SPECIFICATIONS (1MHz sine wave, 4.096V_{p-p}) (Note 1)							
Signal-to-Noise Plus Distortion	SINAD		96		98.5	dB	
Signal-to-Noise Ratio	SNR		96		98.5	dB	
Total Harmonic Distortion	THD				-100	-90	dB
Spurious-Free Dynamic Range	SPDR		92		101	dB	
Full-Power Bandwidth	-3dB point				4	MHz	
Full-Linear Bandwidth	SINAD > 85dB				10	kHz	
Channel-to-Channel Isolation	(Note 4)				96	dB	

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

($V_{DD} = DV_{DD} = +4.75V$ to $+5.25V$, $f_{SCLK} = 4.8MHz$ external clock (50% duty cycle), 24 clocks/conversion (200ksp/s), external $V_{REF} = +4.096V$, $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^{\circ}C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
CONVERSION RATE						
Conversion Time	t_{CONV}	Internal clock, no data transfer, single conversion (Note 5)		5.52	7.07	μs
		External clock		3.75		
Acquisition Time	t_{ACQ}	(Note 6)	729			ns
Serial Clock Frequency	f_{SCLK}	External clock, data transfer and conversion	0.1		4.8	MHz
		External clock, data transfer only			9	
Internal Clock Frequency	f_{INTCLK}	Internal clock	3.2	4.0		MHz
Aperture Delay	t_{AD}			15		ns
Aperture Jitter	t_{AJ}			<50		ps
Sample Rate (Note 7)	f_s	8-bit-wide data-transfer mode	4.17		200.00	ksp/s
		16-bit-wide data-transfer mode	3.125		150.00	
		Internal clock, single conversion, 8-bit-wide data-transfer mode		89		
		Internal clock, single conversion, 16-bit-wide data-transfer mode		68		
		Internal clock, scan mode, 8-bit-wide data-transfer mode (four conversions)		103		
		External clock, scan mode, 16-bit-wide data-transfer mode (four conversions)		82		
Duty Cycle			45	55		%
ANALOG INPUT (AIN_n)						
Input Range	V_{AINL}		0		V_{REF}	V
Input Capacitance	C_{AIN}			45		pF
EXTERNAL REFERENCE						
Input Voltage Range	V_{REF}		3.8		AV_{DD}	V
Input Current	I_{REF}	$V_{AINL} = 0$		110		μA
		SCLK Idle		0.1		
		$V_{CS} = DV_{DD}$, SCLK Idle		0.1		
INTERNAL REFERENCE						
Reference Voltage	V_{REFIN}		4.056	4.096	4.136	V
Reference Short-Circuit Current	I_{REFIC}			13		mA
Reference Temperature Coefficient				+25		ppm/ $^{\circ}C$
Reference Wake-Up Time	t_{RWAKE}	$V_{REF} = 0$		5		ms

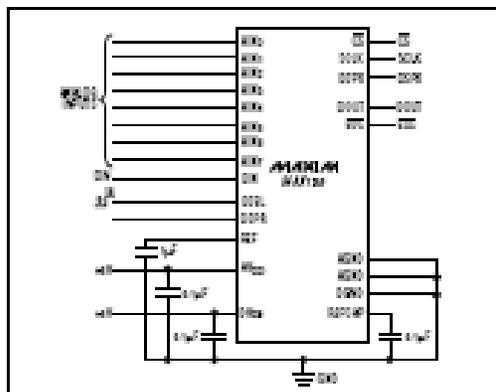


Figure 6. ADC12B07 Timing/Propagation Characteristics

Rosemount 2088 Absolute and Gage Pressure Transmitter

- Absolute and gage pressure ranges from 0–1.5 psi to 0–4,000 psi (0–0.1 to 0–276 bar)
- Performance of 0.075% with high accuracy option
- Rangeability of 20:1
- Lightweight, compact design for cost effective installation
- Optional HART low power



Specifications

Performance Specifications

(Zero-based spans, reference conditions, silicone oil fill, and 316L SST isolating diaphragm.)

Reference Accuracy

- $\pm 0.10\%$ of calibrated span. Includes combined effects of linearity, hysteresis, and repeatability
- $\pm 0.075\%$ of calibrated span (high accuracy option)

Ambient Temperature Effect

Expressed as a total effect per 50 °F (28 °C)
Total effect includes zero and span effects.

$\pm (0.15\% \text{ URL} + 0.15\% \text{ of span})$ from -40 °F to 185 °F
(-40 °C to 85 °C)

Stability

$\pm 0.10\%$ of URL for 12 months

Vibration Effect

Less than $\pm 0.1\%$ of URL when subjected to vibration of: peak to peak constant displacement of 4 mm (5–15 Hz) and constant acceleration of 2 g (15–150 Hz) and 1 g (150–2000 Hz).

Power Supply Effect

Less than 0.01% of calibrated span per volt

Mounting Position Effect

Zero shift of up to 1.2 inH₂O (0.30 kPa), which can be calibrated out. No span effect.

RFI Effect

Less than $\pm 0.25\%$ of upper range limit from 20–1000 MHz at 30 V/m with leads in conduit. Less than $\pm 0.25\%$ of upper range limit from 20–1000 MHz at 10 V/m with unshielded twisted pair (no conduit).

Transient Protection Limits

- IEEE 587 Category B
- 6 kV Crest ($1.2 \times 50 \mu\text{s}$)
- 3 kA Crest ($8 \times 20 \mu\text{s}$)
- 6 kV Crest (0.5 μs by 100 kHz)

IEEE 472

SWC 2.5 kV Crest, 1 MHz waveform

General Specifications

Tested to IEC 801-3

Functional Specifications

Service

Liquid, gas, and vapor applications

Ranges

Range	Minimum Span	URL/Max. span/ Sensor Limit
1	1.5 psi (103 mbar)	30 psi (2.1 bar)
2	7.5 psi (517 mbar)	150 psi (10.3 bar)
3	40 psi (2.8 bar)	800 psi (55.2 bar)
4	200 psi (13.8 bar)	4000 psi (275.8 bar)

Output

Code S: 4–20 mA dc

Code N: 1–5 volt dc, low power

(Outputs are directly proportional to the input pressure)

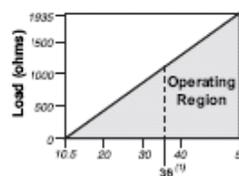
Rangedown

20 to 1

Load Limitations

Reverse polarity protection is standard. Maximum loop resistance is determined by the power supply voltage as described by the following equations:

$$\text{Max. Loop Resistance} = 43.5 (\text{Power Supply Voltage} - 10.5)$$



Power Supply Output Code S (dc Volts)

Communication requires a minimum loop resistance of 250 ohms.

(1) For hazardous location approvals, power supply must not exceed 36 V.

(2) For CEMBLEC Ex/ia approval, the power supply must not exceed 30 V.

Power Supply

External power supply required. Transmitter operates on 10.5–36 V dc with no load (6–12V for Low Power). Reverse polarity protection is standard.

Current Draw

Output Code N: ≤ 3 mA without LCD display.

Overpressure Limits

Range 1: 120 psig max

All other ranges: two times the URL

Burst Pressure

11,000 psi for all ranges

Apéndice

D

Participación en Eventos

Académicos

INTRODUCCIÓN.

En este apéndice aparecen el artículo publicado en la participación del 1er. Encuentro de Investigadores de Posgrado y el reconocimiento otorgado.

SEP

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA



Instituto Tecnológico de Cd. Madero
División de Estudios de Posgrado e Investigación
1er. Encuentro de Investigadores de Posgrado
Otorga el presente

Reconocimiento

Al C. : Jorge Alberto Vázquez Fernández, Aarón González Rdz.

Por haber participado como ponente en este evento en el área : Ingeniería Eléctrica, con el tema:

“Diseño y construcción de un medidor de flujo másico utilizando el principio del tubo calentado”

Evento realizado en esta Institución del 3 al 7 de Diciembre de 2007

Mra. Yolanda Chaves Cinco
M.P. María Yolanda Chávez Cinco
Jefa de la D.E.P.I.



MURSAI. "Magia y Tecnología de la Huasteca" ITCM
Aurc. A. Santiago



Diseño y Construcción de un medidor de flujo másico utilizando el principio del tubo calentado.

Jorge A. Vázquez F., Aarón González R.,

División de Estudios de Posgrado e Investigación
Juventino Rosas y Jesus Urueta, Col. Los Mangos
C.P. 89440, Cd. Madero, Tamaulipas, México.
Email: cggundulain@hotmail.com

Resumen— Muchas veces es necesario cuantificar el flujo de gases en aplicaciones e investigaciones de laboratorio, con la finalidad de obtener procesos más eficientes en donde se analizan propiedades tanto físicas como químicas de diversos compuestos.

La indicación de la medida de flujo es muy importante en diversos procesos químicos que pueden ser parte fundamental en la industria o en diversas aplicaciones de laboratorio.

El diseño y construcción de un medidor de flujo másico que utilice el principio del tubo calentado, tiene como finalidad ser un instrumento de trabajo dentro de las investigaciones que se realizan en el Laboratorio de Catálisis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química dentro de las instalaciones del ITCM.

Las características principales del medidor son:

- Medir flujo másico de aire en un rango de 5 ml/min hasta 1000 ml/min.
- Conseguir una indicación de flujo másico de aire con una resolución de 1 ml/min y con una precisión aproximada de 3%.
- Que se pueda utilizar dentro de las instalaciones del laboratorio de catálisis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.

Una prioridad es el menor costo del instrumento en comparación con los existentes en el mercado.

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de esta investigación es diseñar y construir un instrumento medidor de flujo capaz de indicar, en una forma simple, los caudales de aire que circulan a través de las tuberías con que cuenta el laboratorio de catálisis y así se solventen las necesidades que ahí dominan.

1.1. MEDIDA DE FLUJO

La medida de flujo que circula por una tubería o por un canal es un parámetro que tiene una gran importancia a nivel industrial, fundamentalmente en el primer caso puesto que en gran número de plantas industriales se usan u obtienen distintos tipos de fluidos (combustibles, gases líquidos de refrigeración, productos líquidos o gaseosos, etc.) que circulan a través de diversos conductos.

La cuantificación de lo que esta ocurriendo en el interior de esos conductos se hará midiendo las condiciones de flujo que llevan lo que se consigue mediante algunos parámetro de interés.³

Flujo Másico: se expresa en kg/s (kilómetros por segundo) o en cualquier otra cantidad de masa/tiempo acorde con la cantidad de fluido y es la representación directa de la cantidad de materia que circula por un conducto.³

1.2. PRINCIPIO DEL TUBO CALENTADO.³

La transmisión de calor entre dos puntos de una corriente de fluido o la capacidad de evacuar calor mediante un objeto a alta temperatura pueden ser empleados para la medida de flujo: en la siguiente figura se muestra un sensor de flujo basado en la transferencia de calor entre una fuente y un sensor térmico a través del flujo.⁵

Estos sensores resultan muy problemáticos cuando se pretende de ellos un uso general ya que la relación de la variable a medir (la temperatura del sensor) depende de muchos factores tales como si el flujo es laminar o turbulento, las características del fluido y de la tubería, etc. Por ello, los sensores de este tipo suelen estar calibrados para determinados fluidos y determinados flujos.⁵

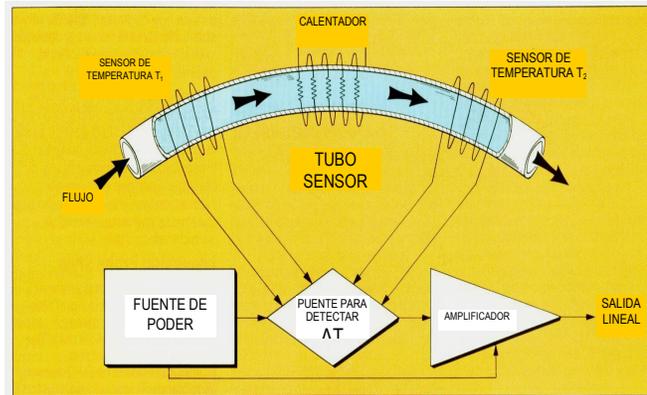
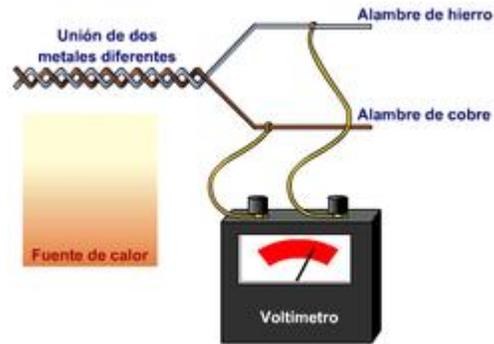


FIGURA 1. Representación del principio del tubo calentado.³

1.3. TERMOPAR⁵

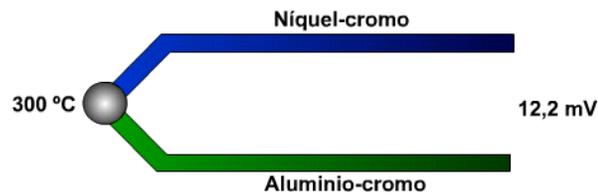
Un termopar es un dispositivo para la medición de temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz conocida como efecto Seebeck.

La fuerza electromotriz generada por el termopar está en función de la diferencia de temperatura entre la unión fría y la caliente, pero más específicamente, esta es generada como un resultado de los gradientes de temperatura, los cuales existen a lo largo de la longitud de los conductores. Como se muestra en la figura 2.

**FIGURA 2.**

La magnitud de la FEM depende de los materiales de los conductores utilizados por el termopar y de sus condiciones metalúrgicas.

En la figura 3 se muestra un termopar tipo K, que es el más popular:

**FIGURA 3.**

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para la elaboración del medidor de flujo másico, se utiliza el esquema de la figura 4, la cual contiene los elementos más ilustrativos para llegar a la elaboración del dispositivo.

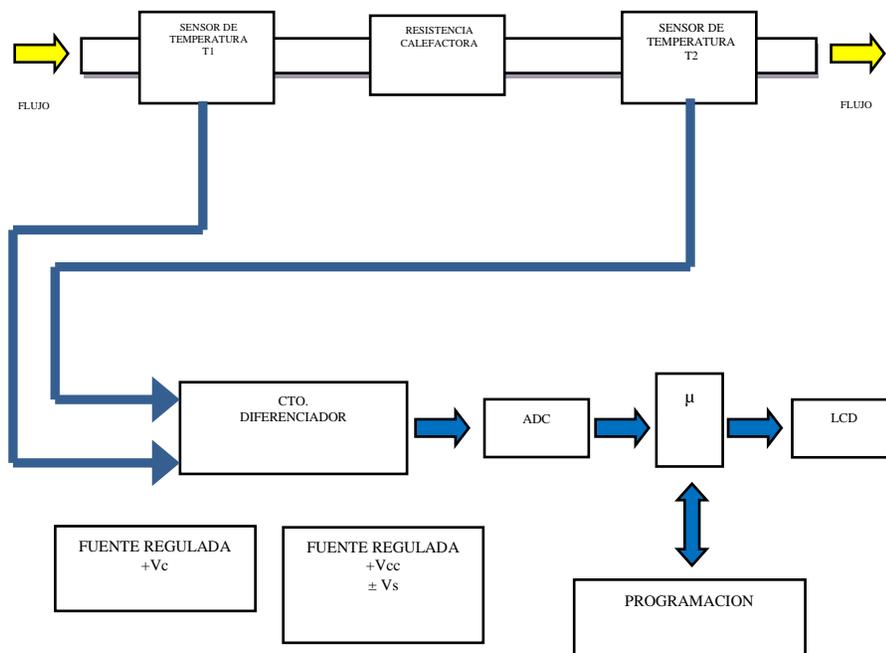


FIGURA 4.

Se utilizaron dos fuentes reguladas, una es la encargada de alimentar a la resistencia calefactora con un voltaje representado por $+V_c$ y otra que es la encargada de suministrar los voltajes $\pm V_s + V_{cc}$ a los demás circuitos.

Este circuito está compuesto por dos partes, una parte analógica, principalmente el sensor y las fuentes reguladas, y otra parte que es la digital, que comprende al microcontrolador, el ADC y el indicador de LCD. A continuación se explicaran a grandes rasgos estas dos partes del circuito principal.

2.1 CIRCUITOS ANALÓGICOS

2.1.1 Fuente de alimentación.

La fuente de alimentación no es más que un dispositivo que convierte la corriente alterna de la red de distribución de la energía eléctrica en otro tipo de corriente eléctrica, todo esto, diseñado para energizar algún dispositivo.⁶

En este proyecto en particular, es necesario tener una fuente que regule tres voltajes, los cuales son: +12 V, -12 V y +5V. Estos voltajes son los encargados de energizar la parte analógica y digital del circuito principal. Para la etapa correspondiente a la resistencia calefactora, es necesario utilizar una fuente independiente que suministre un voltaje regulado de aproximadamente 3.59V y una corriente de alrededor de 1.20A. Esto se logra utilizando un transformador independiente con relación de 127V a 12V, 60Hz con derivación central y un circuito regulador ajustable LM350 que tiene como característica principal que puede regular voltaje con un rango entre 1.2V y 33V con una corriente de salida de 3A. Fue necesaria la utilización de dos fuentes de alimentación ya que los reguladores comerciales no soportan corrientes arriba de 1A, lo cual no es conveniente para la etapa correspondiente a la resistencia calefactora. Por estos motivos se decidió adaptar dos fuentes de alimentación al circuito para que nos proporcione los voltajes utilizados en el diseño. Estas fuentes están diseñadas para funcionar conectándose a la línea de 127 Volts a 60 Hz de frecuencia disponibles. El diagrama general de la fuente de alimentación principal se puede apreciar en la figura 5.

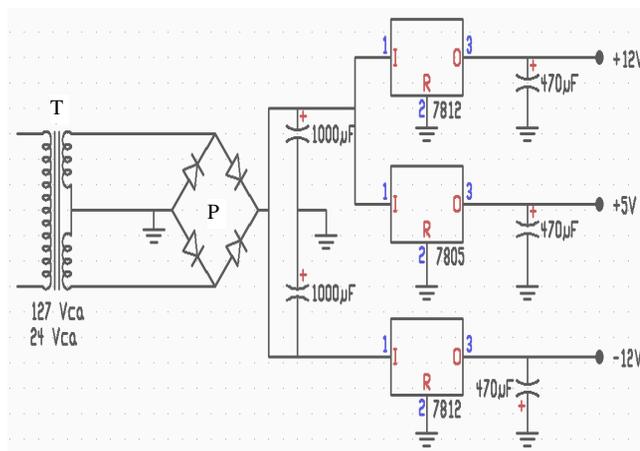


FIGURA 5.- Fuente de alimentación para los circuitos con operacionales y la parte digital.

La fuente regulada utilizada para la etapa de la resistencia calefactora es un poco diferente pues en lugar de usar un regulador de voltaje fijo, como el 7805C o el 7812C, se usa el LM350T, que es un regulador de voltaje ajustable en un rango de 1.2V a 33V, capaz de suministrar hasta 3A de corriente de salida. La figura 6 muestra el circuito de la fuente de alimentación de la resistencia calefactora.

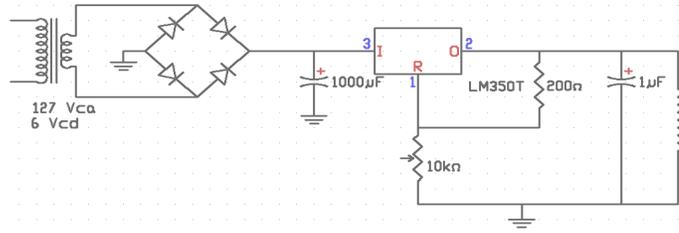


FIGURA 6.- Fuente de alimentación para la resistencia calefactora.

Se usó el circuito LM350T debido a que son muy fáciles de usar, pues con solo dos resistencias pueden establecer la salida de voltaje.

2.1.2. Circuito diferenciador.

Este circuito es una de las etapas más importantes en el desarrollo del medidor de flujo másico ya que es el encargado de detectar los cambios de temperatura indicados en el principio del tubo calentado.

La alta ganancia lineal y el bajo “drift voltage” del circuito amplificador operacional OP177, hace posible obtener un rendimiento elevado de la medición de flujo másico, al poder detectar los cambios en microvoltajes producidos por los termopares tipo k. Este circuito se muestra en la figura 7.

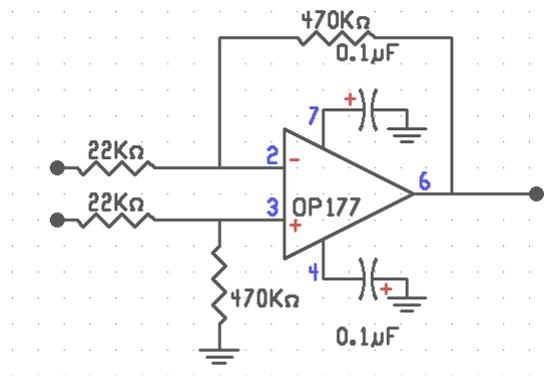


FIGURA 7.- Circuito amplificador diferencial usado para la detección de los cambios de temperatura.

A la salida de este diferencial se pueden observar las variaciones existentes expresadas en mili voltajes.

La entrada inversora del amplificador diferencial estará conectada al termopar que se encuentra a la entrada de flujo de aire, la entrada no inversora del amplificador diferencial estará conectada a la salida del flujo de aire, esto es con la intención de obtener a la salida una señal positiva, para un mejor manejo de la señal en la etapa digital.

2.1.3. Circuito amplificador inversor.

Para integrar la etapa analógica del proyecto con la etapa digital, no es suficiente el mili voltaje que se tiene a la salida del circuito diferenciador, para esto se ocupa un circuito amplificador inversor, pues su relación de salida es lineal con respecto a la entrada. A continuación en la figura 8 se muestra la configuración usada en el amplificador inversor. Se debe tener cuidado al usar esta configuración pues su salida será amplificada aunque de manera invertida, esto es, se debe ajustar la conexión en las entradas del amplificador diferencial haciendo ahora que la entrada inversora del amplificador diferencial estará conectada al termopar que se encuentra a la salida de flujo de aire y la entrada no inversora del amplificador diferencial estará conectada a la entrada del flujo de aire.

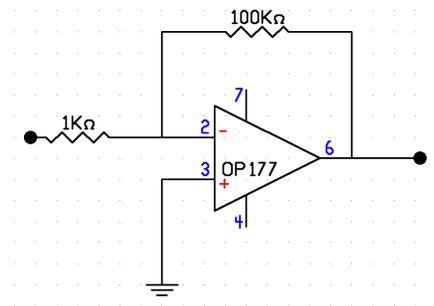


FIGURA 8.- Configuración básica del amplificador inversor.

En esta aplicación la ganancia que se maneja es la relación existente $100K\Omega / 1 K\Omega$.

2.2. CIRCUITOS DIGITALES.

2.2.1. Convertidor análogo-digital.

La conversión analógica-digital es un procedimiento a través del cual una señal analógica de tensión o de corriente unipolar o bipolar es transformada en un código digital N obtenido a partir del cociente entre la magnitud de la señal analógica de entrada y la de una referencia de tensión o de corriente.¹

El ADC que se utilizó en este proyecto es el ADC MAX1168, el cual es un convertidor con una resolución de 16 bits, esto con la firme intención de mostrar una medición lo más precisa posible pues como era de esperarse, las señales provenientes del sensor de flujo másico son muy pequeñas y se optó por usar un convertidor que tuviera características como las siguientes:

- Tiempo de conversión con reloj externo de 3.75µs.
- Resolución de 16 bits.
- Nivel lógico ajustable de +2.7V a +5.25V.
- Rango de voltaje de entrada: 0 a V_{REF}.
- “Offset Drift” de 1 ppm/°C.⁶

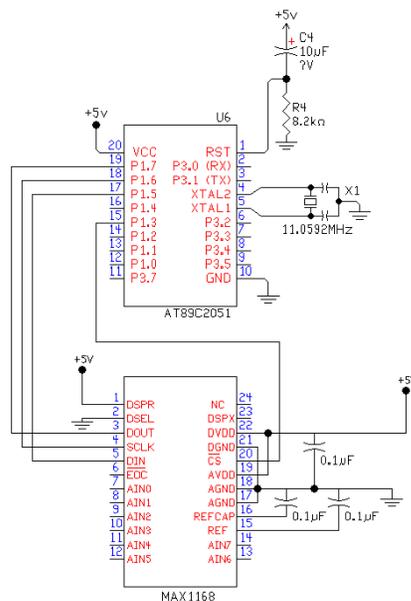


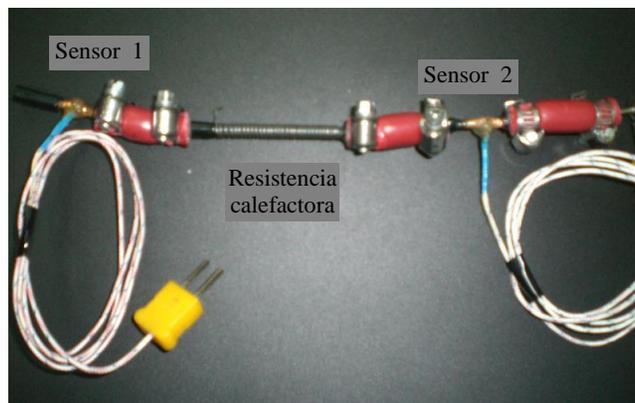
FIGURA 9.- Diagrama de conexiones del ADC MAX 1168 al microcontrolador.

2.2.2. Microcontrolador.

El microcontrolador es el encargado de vincular toda la parte analógica del sistema con la salida visual en el indicador LCD, ya que se encarga de realizar las operaciones necesarias para cumplir la función del medidor se podría definir como el “cerebro” del proyecto, él organiza todos los procesos interactuando con el exterior por medio de sus puertos de Entrada/Salida y realiza todas las operaciones aritméticas que son necesarias para cumplir el cometido del medidor. ¹

3. EL MEDIDOR DE FLUJO MÁSIICO.

En la fotografía 1 se observa el sensor utilizado para la construcción del medidor de flujo másico:



FOTOGRAFIA 1.- Sensor fabricado para medir el flujo másico de aire.

Este sensor detecta los cambios de temperatura existentes en dos puntos a los extremos de el tramo de tubería por donde se hace circular un flujo de aire, al centro de la misma se encuentra un elemento conocido como resistencia calefactora, que está constituido por un enrollamiento de alambre de constantan, cuya característica es la relación de resistencia en ohms ofrecida por cada metro de alambre que se tenga. Este alambre de constantan en particular posee una relación de $4\Omega / m$. y fue ideal para la realización del mismo.

La detección de temperatura se logra utilizando unos sensores comerciales conocidos como termopares tipo k, estos termopares tienen una sensibilidad a la temperatura que se expresa en un voltaje muy pequeño. El termopar tipo k tiene una salida de $40\mu\text{V}$ por cada $^{\circ}\text{C}$ de temperatura que detecte, por esto es necesario utilizar elementos electrónicos de muy alta precisión cuando se quiera trabajar con estos componentes con la finalidad de ser lo más exacto al momento de medir el flujo másico de aire que pase por la tubería.

Al inicio de la construcción de este prototipo se hizo una necesidad adquirir un equipo para la realización de pruebas al sensor y se tomó la decisión de comprar un compresor de aire.

Ya con el compresor se siguen haciendo pruebas al medidor y está en proceso la finalización de este medidor de flujo másico.

4. RESULTADOS.

Este proyecto en general ha dado buenos resultados, debido a que en un principio no se tenía la mínima idea de cómo realizar este diseño, se partió de cero. Muchos materiales fueron utilizados con la intención de definir un elemento sensor, se inició con bobinados de alambre de magneto, pero no funcionó debido a problemas debidos a la falta de precisión en los elementos, luego se utilizó el alambre que contienen las resistencias de potencia, pero debido a que era demasiado delgado no se pudo utilizar, también se utilizó alambre constante pero era demasiado rígido, hasta que se utilizaron dos elementos termopares de las mismas características y con ellos se han obtenido resultados favorables.

5. CONCLUSIONES.

Es posible diseñar y construir un medidor de flujo másico de aire utilizando el principio del tubo calentado con elementos comunes que se pueden encontrar en la localidad,

también hay que hacer mención que la circuitería utilizada y sus principios de operación y manejo son las mismas que se aprendieron en los estudios profesionales, eso quiere decir que se cuenta con las bases y herramientas necesarias para la resolución de problemas técnicos en la vida profesional.

6. Referencias

- (1) Tocci Ronald, Widmer Neal, sistemas digitales, octava edición, Pearson educación, México, 2003.
- (2) <http://www.atmel.com>
- (3) OMEGA, the flow and level handbook, Omega engineering Inc., U.S.A., 1990.
- (4) <http://www.maxim-ic.com>
- (5) <http://es.wikipedia.org/wiki/termopar>
- (6) L. Boylestad Robert, *Fundamentos de electrónica*, Prentice Hall, 1997, Primera edición.

7. Biografías



M.C. Aarón González Rodríguez, nacido en Tampico, Tamps México en 1953. Se graduó de Ingeniero Electricista en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero en 1977 y realizó su Maestría en Ciencias en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN en México D.F. en 1979. Trabaja como Profesor Investigador en el I.T.C.M. Su área de investigación es la Electrónica de Potencia.



Referencias

Libros:

- (1) Tocci Ronald, Widmer Neal, sistemas digitales, octava edición, Pearson educación, México, 2003.
- (2) Pérez Miguel, Álvarez Juan, Campo Juan, Ferrero Francisco Javier, Grillo Gustavo, instrumentación electrónica, tercera edición, Editorial Thomson, España, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo, 2004.
- (3) L. Boylestad Robert, *Fundamentos de electrónica*, Prentice Hall, 1997, Primera edición.

Revistas:

- (4) OMEGA, the flow and level handbook, Omega engineering Inc., U.S.A., 1990.

Direcciones Electrónicas:

- (5) <http://www.atmel.com>
- (6) <http://www.maxim-ic.com>
- (7) <http://es.wikipedia.org/wiki/termopar>
- (8) <http://www.electronicafacil.net/tutoriales>