

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR Y UN TRANSMISOR MICROPROCESADO PARA FLUJO DE AIRE

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

MARTÍN LUTERO LEMA GALLARDO

DIRECTOR: ING. ANA RODAS B.

Quito, Septiembre de 2008

ÍNDICE

RESUMEN.....	X
PRESENTACIÓN.....	XI

I. ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA.

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PROPIEDADES DEL AIRE.....	2
1.2.1 <i>TEMPERATURA</i>	2
1.2.2 <i>PRESIÓN</i>	3
1.2.2.1 Presión atmosférica.....	3
1.2.2.2 Presión relativa.....	4
1.2.2.3 Presión absoluta.....	4
1.2.3 <i>DENSIDAD</i>	4
1.2.3.1 Densidad absoluta.....	5
1.2.3.2 Densidad relativa.....	6
1.2.3.3 Densidad media y puntual.....	6
1.2.4 <i>VELOCIDAD</i>	6
1.2.5 <i>FLUJO</i>	8
1.3 SENSOR DE FLUJO DE AIRE.....	9
1.3.1 <i>SENSOR VOLUMÉTRICO DE FLUJO DE AIRE</i>	10
1.3.2 <i>SENSOR MÁSSICO DE FLUJO DE AIRE</i>	10
1.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE.....	10
1.4.1 <i>MÉTODO DE DESPLAZAMIENTO</i>	11
1.4.1.1 Sensor de copas.....	11
1.4.2 <i>MÉTODO DE VOLTAJE INDUCIDO</i>	13
1.4.2.1 Molino de viento.....	13
1.4.3 <i>MÉTODO DE PRESIÓN DIFERENCIAL</i>	14
1.4.3.1 Rotámetro.....	14
1.4.3.2 Tubo Venturi.....	15

1.4.3.3 Tubo de Pitot	16
1.4.3.4 Sensor de placa orificio	17
1.4.3.5 Sensor de orificio variable	18
1.4.3.6 Neumotacógrafo de Fleish	19
1.4.3.7 Neumotacógrafo de Lilly	21
1.4.3.8 Sensor universal vortex	21
1.4.4 <i>MÉTODO TÉRMICO</i>	22
1.4.4.1 Sensores de alambre o capa caliente	23
1.4.4.2 Sensores calorimétricos	25
1.4.4.3 Sensores según el tiempo de vuelo	26
1.4.5 <i>MÉTODO ACÚSTICO</i>	26
1.4.5.1 Sensores Doppler	27
1.4.5.2 Sensores de tránsito	28
1.5 SENSORES MÁSIKO TÉRMICOS DE FLUJO DE AIRE	29
1.5.1 <i>CONSIDERACIONES DE DISEÑO</i>	29
1.5.2 <i>PRINCIPIO FÍSICO DE MEDICIÓN</i>	30
1.5.3 <i>MODOS DE OPERACIÓN</i>	31
1.5.3.1 Operación a voltaje constante	31
1.5.3.2 Operación a corriente constante	32
1.5.3.3 Operación a temperatura constante	32
1.5.4 <i>COMPENSACIÓN POR LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA</i>	34
1.6 ELABORACIÓN DE SENSORES INDUSTRIALES DE FLUJO DE AIRE	34
1.7 SENSORES MÁSIKOS DE FLUJO DE AIRE EN EL MERCADO	37
1.8 APLICACIONES DE SENSORES DE FLUJO DE AIRE EN LA INDUSTRIA	38
1.9 SENSOR Y TRANSMISOR MICROPROCESADO PARA FLUJO DE AIRE	39

II. DISEÑO DEL HARDWARE DEL SENSOR DE FLUJO MÁSIKO TÉRMICO DE AIRE.

2.1 INTRODUCCIÓN	40
2.2 DISEÑO DEL SENSOR DE FLUJO DE AIRE	41
2.2.1 ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SENSOR	41
2.2.1.1 Armazón.....	41
2.2.1.2 Aislamiento térmico.....	42
2.2.1.3 Calefactor.....	43
2.2.1.4 Soportes.....	44
2.2.1.5 Aislamiento eléctrico.....	45
2.2.2 CIRCUITO ELÉCTRICO DEL SENSOR	46
2.2.2.1 Circuito de calefacción.....	46
2.2.2.2 Instrumentación.....	49
2.3 DISEÑO DEL TRANSMISOR DE FLUJO DE AIRE	50
2.3.1 ETAPA DE ADQUISICIÓN	50
2.3.1.1 Sensores de temperatura.....	50
2.3.1.2 Acondicionamiento de señales.....	50
2.3.2 ETAPA DE PROCESAMIENTO DE DATOS	52
2.3.2.1 Hardware del microcontrolador.....	52
2.3.2.2 Pulsantes.....	54
2.3.3 ETAPA DE VISUALIZACIÓN Y TRANSMISIÓN DE DATOS	54
2.3.3.1 Visualización en módulo LCD.....	54
2.3.3.2 Salida normalizada de voltaje.....	56
2.3.3.3 Salida normalizada de corriente.....	57
2.3.3.4 Comunicación serial en protocolo RS-232.....	59

III. DISEÑO DEL SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR.

3.1 INTRODUCCIÓN	62
3.2 DISEÑO DEL SOFTWARE	62
3.2.1 PROGRAMA PARA EL MICROCONTROLADOR PIC16F876A	62
3.2.1.1 Configuración de registros del conversor A/D.....	66
3.2.1.2 Inicialización del módulo LCD.....	66
3.2.1.3 Configuración de registros del módulo CCP.....	70
3.2.1.4 Configuración de registros del módulo USART.....	71

3.2.1.5 Declaración de variables.....	72
3.2.1.6 Configuración de pórtricos de entrada y salida.....	73
3.2.1.7 Presentación en módulo LCD.....	74
3.2.1.8 Pre calentamiento del sensor.....	75
3.2.1.9 Determinación de magnitudes y unidades de medida a visualizar.....	76
3.2.1.10 Adquisición de datos analógicos.....	77
3.2.1.11 Ampliación de datos de temperatura de 8 a 16 bits.....	78
3.2.1.12 Cálculo de velocidad y flujo de aire.....	79
3.2.1.13 Visualización de datos en módulo LCD.....	79
3.2.1.14 Generación de señal PWM para voltaje y corriente.....	80
3.2.1.15 Salida serial de dato de flujo de aire.....	81

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS.

4.1 PRUEBAS EN EL SENSOR MÁSIICO TÉRMICO DE FLUJO DE AIRE.....	82
4.1.1 PRUEBA DE DUREZA Y AISLAMIENTO ELÉCTRICO Y TÉRMICO.....	82
4.1.2 PRUEBA DEL ELEMENTO CALEFACTOR.....	82
4.1.3 PRUEBA DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL ELEMENTO CALEFACTOR.....	83
4.1.4 PRUEBA DEL SENSOR MÁSIICO TÉRMICO DE FLUJO DE AIRE.....	83
4.2 PRUEBAS EN EL TRANSMISOR MICROPROCESADO.....	85
4.2.1 PRUEBA DEL ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.....	85
4.2.2 PRUEBA DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS ANALÓGICOS.....	86
4.2.3 PRUEBA DE LA ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DE AIRE.....	87
4.2.4 PRUEBA DE LA ESTIMACIÓN DE FLUJO DE AIRE.....	89
4.2.5 PRUEBA DE LA SALIDA NORMALIZADA DE VOLTAJE.....	90
4.2.6 PRUEBA DE LA SALIDA NORMALIZADA DE CORRIENTE.....	91
4.2.7 PRUEBA DE LA COMUNICACIÓN SERIAL.....	94
4.3 HOJA DE DATOS DEL SENSOR Y TRANSMISOR DE FLUJO	

DE AIRE	95
----------------------	-----------

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES	96
-------------------------------	-----------

5.2 RECOMENDACIONES	98
----------------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	99
---------------------------	-----------

ANEXOS	102
---------------------	------------

I. ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA.

1.1 INTRODUCCIÓN

La atmósfera es la mezcla homogénea de varios gases que rodea nuestro planeta y que no escapan por efecto del campo gravitatorio. Está constituida principalmente por nitrógeno (78%) y oxígeno (21%). El 1% restante lo forman el argón (0,9%), el dióxido de carbono (0,03%), distintas proporciones de vapor de agua, y trazas de hidrógeno, ozono, metano, monóxido de carbono, helio, neón, kriptón y xenón.

El estudio de muestras indica que hasta los 88 Km. por encima del nivel del mar la composición de la atmósfera es sustancialmente la misma que al nivel del suelo. El movimiento continuo ocasionado por las corrientes atmosféricas contrarresta la tendencia de los gases más pesados a permanecer por debajo de los más ligeros.

La temperatura en la atmósfera va desde -79 °C a unos 16 Km en las regiones tropicales hasta 1200 °C en la ionosfera. En la tropósfera esta variable suele bajar 5.5 °C por cada 1.000 metros. El contenido en vapor de agua del aire varía considerablemente en función de la temperatura y de la humedad relativa. Con un 100% de humedad relativa, máxima cantidad de vapor de agua admisible a una determinada temperatura, la cantidad de vapor de agua varía de 190 partes por millón (ppm) a -40 °C hasta 42.000 ppm a 30 °C. Otros elementos que en ocasiones constituyen parte de la atmósfera en cantidades minúsculas son el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y óxidos, como los de azufre y nitrógeno cerca de los volcanes, arrastrados por la lluvia o la nieve. [1]

¹ Enciclopedia Encarta 2007. "La atmósfera".

1.2 PROPIEDADES DEL AIRE

Siendo el aire una mezcla compleja de varios elementos tiene propiedades y características físicas propias que requieren ser estudiadas para la comprensión de fenómenos en los que intervenga.

1.2.1 TEMPERATURA

El concepto de temperatura se deriva de la idea de medir el calor o frialdad relativos y de la observación de que el suministro de calor a un cuerpo conlleva un aumento de su temperatura mientras no se produzca la fusión o ebullición. En el caso de dos cuerpos con temperaturas diferentes, el calor fluye del más caliente al más frío hasta que sus temperaturas sean idénticas y se alcance el equilibrio térmico debido a la transferencia de calor. Por tanto, los términos de temperatura y calor, aunque relacionados entre sí, se refieren a conceptos diferentes: la temperatura es una propiedad cuantificable de un cuerpo que refleja el nivel térmico del mismo, su capacidad para ceder energía calorífica y el calor es un flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas.

Los cambios de temperatura afectan de forma importante a las propiedades de todos los materiales. La temperatura de la atmósfera se ve muy influida tanto por las zonas de tierra como de mar. A bajas alturas, la temperatura del aire está determinada en gran medida por la temperatura de la superficie terrestre. Los cambios periódicos de temperatura se deben básicamente al calentamiento por la radiación del Sol de las zonas terrestres del planeta, que a su vez calientan el aire situado por encima.

En un gas la temperatura es una magnitud que se relaciona con la medida de la velocidad media con que se mueven las partículas en su interior; no depende del número de partículas en movimiento sino de su velocidad media, es decir; a mayor velocidad media se producen mayor cantidad de choques entre partículas

liberando energía que aumenta la temperatura. No depende por tanto de la masa total del cuerpo.

Las unidades de medida de la temperatura son los grados Centígrados o Celsius, Kelvin, Fahrenheit y Rankine.

La temperatura está relacionada con la presión.

1.2.2 PRESIÓN

Está definida como la relación entre la fuerza aplicada a una determinada superficie. Cuando el aire está frío, éste desciende, haciendo aumentar la presión y provocando estabilidad. Se forma, entonces, un anticiclón térmico. Cuando el aire está caliente, asciende, haciendo bajar la presión y provocando inestabilidad. Se forma entonces un ciclón o borrasca térmica.

Además, el aire frío y el cálido tienden a no mezclarse, debido a la diferencia de densidad, y cuando se encuentran en superficie, el aire frío empuja hacia arriba al aire caliente provocando un descenso de la presión e inestabilidad, por causas dinámicas. Se forma entonces un ciclón, o borrasca dinámica. Esta zona de contacto es la que se conoce como frente. Cuando el aire frío y el cálido se encuentran en altura, descienden en convergencia dinámica, haciendo aumentar la presión y provocando estabilidad, y el consiguiente aumento de la temperatura. Se forma, entonces un anticiclón dinámico.

Se conocen tres tipos de presión: atmosférica, efectiva o relativa y absoluta.

1.2.2.1 Presión atmosférica

Se refiere a la presión ejercida por el peso del aire que se encuentra sobre la superficie de la tierra. La atmósfera tiene una presión media de 1013.25 hPa al nivel del mar, medido en latitud 45°. La medida de presión atmosférica del Sistema Internacional de Unidades (SI) es el newton por metro cuadrado (N/m²) o

Pascal (Pa). La presión atmosférica a nivel del mar en unidades internacionales es 101325 Pa, equivalente a 760 torrs o mm de mercurio. En torno a los 5,6 Km. es de 380 torrs; la mitad de todo el aire presente en la atmósfera se encuentra por debajo de este nivel. La presión disminuye más o menos a la mitad por cada 5,6 Km. de ascensión. A una altitud de 80 Km. la presión es de 0,007 torr.

1.2.2.2 Presión relativa

Conocida también como presión efectiva, resulta de la diferencia entre una presión determinada en un punto menos la presión atmosférica en sus alrededores. Para la medición de esta magnitud se utiliza un elemento de medida llamado manómetro.

1.2.2.3 Presión absoluta

Este concepto viene relacionado con la presión medida tomando como referencia el cero absoluto de temperatura.

1.2.3 DENSIDAD

En física el término densidad (ρ) es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, sinónimo de masa volúmica y puede utilizarse en términos absolutos o relativos. En términos sencillos, un objeto pequeño y pesado, como una piedra o un trozo de plomo, es más denso que un objeto grande y liviano, como un corcho o un poco de espuma.

Las unidades de densidad en el SI son: kilogramo sobre metro cúbico (Kg/m^3) y gramo sobre centímetro cúbico (g/cm^3).

Fuera del SI se tiene: kilogramo sobre litro (kg/l), gramo sobre mililitro (g/ml), onza sobre pulgada cúbica (oz/in^3), libra sobre pulgada cúbica (lb/in^3), libra sobre pie cúbico (lb/ft^3), libra sobre yarda cúbica (lb/yd^3), libra sobre galón (lb/gal), libra sobre bushel americano (lb/bu) y slug sobre pie cúbico.

En general, la densidad de un material varía al cambiar la presión o la temperatura. Se puede demostrar utilizando la termodinámica que al aumentar la presión debe aumentar la densidad de cualquier material estable. En cambio, si bien al aumentar la temperatura usualmente decrece la densidad de los materiales, hay excepciones notables.

La densidad de los gases es fuertemente afectada por la presión y la temperatura. Efectivamente, la ley de los gases ideales describe matemáticamente la relación entre estas tres magnitudes como se puede observar en la ecuación 1.1.

$$\rho = \frac{mP}{RT} \quad \text{Ec. 1.1}$$

donde R es la constante universal de los gases ideales, P es la presión del gas, m su masa molar y T la temperatura absoluta.

Eso significa que un gas ideal duplicará su densidad si se duplica la presión o alternativamente se reduce su temperatura a la mitad.

La densidad del aire seco al nivel del mar representa aproximadamente un 1/800 de la densidad del agua. A mayor altitud desciende con rapidez, siendo proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura.

1.2.3.1 Densidad absoluta

La densidad absoluta o densidad normal, también llamada densidad real, expresa la masa por unidad de volumen. Cuando no se hace ninguna aclaración al respecto, el término densidad suele entenderse en el sentido de densidad absoluta. La densidad es una propiedad intensiva de la materia producto de dos propiedades extensivas: masa y volumen.

1.2.3.2 Densidad relativa

La densidad relativa o aparente expresa la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua, resultando una magnitud adimensional. La densidad del agua tiene un valor de 1 kg/l, a las condiciones de 1 atm y 4 °C, equivalente a 1000 kg/m³. Aunque la unidad en el SI es kg/m³, también es costumbre expresar la densidad de los líquidos en g/cm³.

1.2.3.3 Densidad media y puntual

Para un material homogéneo, la fórmula masa/volumen puede aplicarse sin reparos. En el caso de un objeto no homogéneo, en cambio, dicha fórmula tiene el problema de que las densidades de las distintas partes son diferentes. En este caso, se puede medir la densidad media, aplicando la fórmula masa/volumen a todo el objeto, o la densidad puntual que será distinta en cada punto del objeto.

La densidad media de un material no es una propiedad intrínseca y depende de la forma en la que el material haya sido tratado: si está en granos o en polvo ocupará más espacio que si está en forma compacta.

1.2.4 VELOCIDAD

Velocidad del aire es uno de los parámetros que se incluye en los cálculos de la sensación térmica. Se expresa en m/s (metro/segundo) y se mide con diversos tipos de anemómetros.

El aire en movimiento o viento se suele aplicar al movimiento horizontal propio de la atmósfera; los movimientos verticales, o casi verticales, se llaman corrientes. Los vientos se producen por diferencias de presión atmosférica, atribuidas, sobre todo, a diferencias de temperatura. Las variaciones en la distribución de presión y temperatura se deben, en gran medida, a la distribución desigual del calentamiento solar, junto a las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. Cuando las temperaturas de regiones adyacentes difieren, el aire más caliente tiende a ascender y a soplar sobre el aire más frío y, por

tanto, más pesado. Los vientos generados de esta forma suelen quedar muy perturbados por la rotación de la Tierra.

Los marinos y los meteorólogos utilizan la escala de Beaufort para indicar la velocidad del viento. Fue diseñada en 1805 por el hidrógrafo irlandés Francis Beaufort. Los avisos de estados peligrosos para las pequeñas embarcaciones se suelen emitir para vientos de fuerza 6 en esta escala.

A continuación en la tabla 1.1 se puede observar las velocidades del viento así como su clasificación.

Beaufort	Velocidad del viento (Km/h)	Indicación	Concepto/ valoración
0	0 - 2	El humo asciende verticalmente	tranquilo
1	2 - 5	El humo se desvía suavemente hacia un lado	suave
2	6 - 12	El viento se percibe en la piel	suave
3	13 - 20	Se mueven banderas ligeras	moderado
4	21 - 29	Se mueve polvo y papeles	moderado
5	30 - 39	Pequeños árboles empiezan a mecerse al viento	vivo
6	40 - 50	Los paraguas ya no se pueden utilizar	fuerte
7	51 - 61	Todos los árboles se mueven fuertemente / ya cuesta trabajo moverse contra la dirección del viento	fuerte
8	62 - 74	Las astas de los árboles se quiebran	muy fuerte
9	75 - 87	Pueden presentarse daños importantes en edificios	muy fuerte
10	88 - 101	Pueden presentarse los peores daños en edificios	masivo
11	102 - 116	Pueden presentarse los peores daños en edificios	masivo
12	117 >	Aniquilamiento de las construcciones más fuertes / se buscan refugios inmediatamente	huracanes

Tabla 2.1 VELOCIDADES DEL VIENTO^[2]

² ANONIMO. <http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores.htm>.

1.2.5 FLUJO

Se encuentra definido como el volumen de fluido que atraviesa por una determinada sección transversal. Dimensionalmente es la relación entre volumen y tiempo.

El flujo del aire tiene muchas similitudes con el del agua. Puede ser laminar y turbulento. El viento laminar adopta trayectorias de hilos paralelos a la superficie terrestre a diferencia del viento turbulento donde los hilos adoptan trayectorias de carácter helicoidal. El viento se hace turbulento a partir de cierta velocidad crítica, aproximadamente 1 metro/segundo.

Todos los vientos con capacidad morfogenética, es decir aquellos que pueden desarrollarse por sí mismos, tienen carácter turbulento, ya que sólo los vientos fuertes son lo suficientemente competentes para transportar partículas: la carga eólica. Para la acción morfogenética la velocidad es más importante que la frecuencia. Las rachas de viento que mueven grandes cantidades de partículas son muy eficaces. La dirección de estas rachas es variable, por lo que su acción morfogenética no se concentra en un punto o dirección. La velocidad del viento, provocada por causas meteorológicas, se ve modificada por las características de la superficie por la que corre. El paso de una superficie lisa a otra rugosa provoca un descenso de la velocidad; el paso de una superficie rugosa a otra lisa provoca su aumento. La rugosidad depende de la cantidad de derrubios de calibre medio. Estas diferencias de velocidad son esenciales para la acción morfogenética del viento.

La presencia de partículas en movimiento dentro del flujo perturba profundamente la velocidad del viento. Cuantas más partículas menor velocidad, ya que el viento es más denso. La humedad del aire dificulta la presencia de partículas en el aire, ya que si están húmedas, por un lado pesan más, y por otro tienden a aglutinarse.

La competencia de la acción eólica se limita a las partículas de menor tamaño, que además no puede mantenerla en suspensión durante mucho tiempo. Las

partículas que sí puede mantener en suspensión durante mucho tiempo tienen un escaso poder erosivo. La carga impulsada por el viento es muy rica en minerales. Predominan los cristales de sal, yeso, cal, sílice y arcillas. Los elementos salinos se caracterizan por su reducido tamaño.

1.3 SENSOR DE FLUJO DE AIRE

Se llama sensor al instrumento que produce una señal que refleja el valor de una propiedad, mediante alguna correlación definida. La relación entre la variable del proceso y el fenómeno físico en el que se basa el sensor es dada por la ganancia del mismo.

En el mercado existe una gran variedad de sensores de flujo que difieren unos de otros en su rango, exactitud, precisión, calibración, costo, materiales de los que están elaborados y principalmente en el tipo de fluido que pueden medir, el mismo que depende de su principio de funcionamiento. Es por esto que todos los sensores de flujo de aire tienen un denominador común: se limitan a las propiedades físicas y químicas del aire, como son la compresibilidad, impedancia eléctrica, etc.

El flujo es una variable muy importante ya que su conocimiento es indispensable en los balances de materia y energía. El costo y las dificultades técnicas para la medición hacen que su uso sea menos difundido. Una clasificación exhaustiva se la puede encontrar en la norma británica BS-7405.

Esta norma fue emitida el 30 de agosto de 1991, se titula “Guía para selección y aplicación de sensores de flujo en la medición de un fluido en conductos cerrados” y detalla todo lo concerniente a medidores de flujo, fluidos, conductos, sistemas industriales, rendimiento, instrumentos, calibración y errores. Se encuentra a la venta en el mercado a un precio aproximado de £202. [³]

³ ANONIMO.

http://www.standardsdirect.org/standards/standards5/StandardsCatalogue24_view_6485.html

1.3.1 SENSOR VOLUMÉTRICO DE FLUJO DE AIRE

Su función es la de determinar el flujo en volumen del fluido directa o indirectamente, aprovechando otras propiedades del flujo de aire, tales como: presión diferencial, velocidad, fuerza, etc. [⁴]

1.3.2 SENSOR MÁSIKO DE FLUJO DE AIRE

Al igual que los sensores volumétricos, estos sensores pueden medir el flujo de aire directamente aprovechando las propiedades mesurables de la masa del aire o realizando mediciones volumétricas y realizando una posterior corrección para variaciones de densidad, presión y temperatura.

Existen tres tipos de sensores másicos de aire: térmicos, de momento angular y de presión diferencial (puente hidráulico).

1.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE

Con el pasar del tiempo se han desarrollado diferentes tipos de sensores de flujo de aire, pero los métodos de medición se han mantenido desde los inicios de la instrumentación. En esta sección se realiza un estudio de los métodos de medición y se presentan algunos tipos de sensores.

Los sensores de flujo de aire se basan en la detección de cambios de otra propiedad física para indirectamente obtener una magnitud de flujo. Es por esto que los métodos de medición de flujo de aire son similares a los métodos de medición de presión (sensores de presión relativa) y velocidad del aire (anemómetros).

⁴ CREUS, ANTONIO. Instrumentación Industrial. Alfaomega Editores. Séptima Edición. México. 2007. Pág. 104.

1.4.1 MÉTODO DE DESPLAZAMIENTO

Ya que el aire es un gas incoloro es necesario traducir el movimiento del aire en movimiento mecánico de algo que se pueda apreciar. Por tanto los sensores que se basan en este método consisten en obtener la medición a través de un acople mecánico con relación fija de transformación de velocidades. Este procedimiento es bastante sencillo y económico pero presenta un tiempo de reacción alto ya que los cambios en la visualización del resultado dependen de la inercia mecánica del dispositivo. Un sensor basado en este principio es el sensor de copas.

1.4.1.1 Sensor de copas

Es el tipo más simple de anemómetro, fue inventado en 1846 por el Dr. John Thomas Romney Robinson, del Observatorio de Armagh. Está constituido por cuatro copas hemisféricas cada una montada al final de un brazo horizontal, mismos que fueron dispuestos en ángulos iguales unos respecto a otros sobre un árbol vertical.

En la figura 1.1 se observa el primer anemómetro de cuatro copas elaborado en la historia.



Figura 1.1 SENSOR DE COPAS.^[5]

El flujo de aire que pasa por las copas en cualquier dirección horizontal las hace girar a una velocidad angular proporcional a la velocidad del viento. Por tanto contar los giros de las copas en un determinado periodo de tiempo determina la velocidad de aire promedio para amplios rangos de velocidades. En un anemómetro con cuatro copas se aprecia que, partiendo de que las copas están ordenadas de manera simétrica al final de los brazos, el viento siempre empujará a una de ellas en su cavidad mientras que en la parte de atrás de la contraria no tendrá mayor incidencia. Estudios de las fuerzas involucradas muestran que la fuerza es mayor en el lado de la copa del dispositivo y que la fuerza neta causa el giro de las copas.

Desafortunadamente, cuando Robinson diseñó por primera vez su anemómetro, él no se preocupó por el tamaño de las copas o a la longitud de los brazos ya que calculó que la velocidad lineal de las copas siempre se movió a un tercio de la velocidad del viento. Este resultado fue aparentemente confirmado por varios experimentos recientes e independientes, pero lejanos a la realidad. Últimamente se descubrió que la relación verdadera entre la velocidad del viento y la de las

⁵ <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Wea00920.jpg>

copas, llamada el factor anemómetro, depende de las dimensiones de las copas y los brazos, y se encuentra entre dos y algo más que tres.

El anemómetro de tres copas desarrollado por el canadiense John Patterson en 1926 y subsiguiente copa mejorada por Brevoort & Joiner de los Estados Unidos en 1935 condujo al diseño de una rueda de copas que es lineal y tiene un error menor al 3% sobre las 60 mph. Patterson encontró que cada copa produce torque máximo cuando ésta se encuentra a 45 grados del flujo de aire. El anemómetro de tres copas tiene también más torque constante y responde más rápidamente a las ráfagas que el de cuatro copas.

El anemómetro de tres copas fue modificado por el australiano Derek Weston en 1991 para medir la dirección y velocidad del viento. Weston añadió una etiqueta a una copa, esto causó que la rapidez de la rueda de copas incremente y decremente alternativamente según la etiqueta se muestre contra el viento. La dirección del viento es calculada según estos cambios cíclicos de la rapidez, mientras que la velocidad del viento se determinaba según el promedio de la rapidez de la rueda de copas.

1.4.2 MÉTODO DE VOLTAJE INDUCIDO

Consiste en obtener energía eléctrica a partir de la energía cinética del viento. Resulta un poco más sofisticado que el simple acople mecánico con relación fija de transformación de velocidades. Un ejemplo de este método de medición es el molino de viento.

1.4.2.1 Molino de viento

El eje de giro del molino de viento es paralelo al flujo de aire. El sensor se encuentra constituido por un propulsor o turbina que genera un flujo magnético a partir del movimiento y una cola dispuesta en el mismo eje para que cuando el flujo tenga cierta inclinación ésta se desplace un ángulo para corregir y mantener la condición de paralelismo y así obtener mediciones exactas y precisas.



Figura 1.2 ANEMÓMETRO DE TIPO MOLINO DE VIENTO⁶

1.4.3 MÉTODO DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Se encuentra sustentado por el Teorema de Bernoulli formulado en 1738. Este enunciado dice que cuando un fluido aumenta su velocidad disminuye su presión y viceversa. En este principio se basan la gran mayoría de sensores, entre los más conocidos se tienen los siguientes:

1.4.3.1 Rotámetro

Se trata de un cono transparente invertido con una bola plástica en su base. El fluido al circular impulsa la bola hacia arriba, a mayor caudal más sube la bola. La gravedad hace bajar la bola al detenerse el flujo. El cono tiene unas marcas que indican el caudal.

Es el medidor de área más importante en el cual la caída de presión es prácticamente constante, mientras que el área por la que circula el fluido varía con la velocidad del flujo. A partir de un calibrado, se relaciona el área con la velocidad de flujo.

⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Wind_speed_and_direction_instrument_-_NOAA.jpg



Figura 1.3 ROTÁMETRO

Generalmente es empleado para medir gases en lugares donde se requiere conocer el caudal con poca precisión. Se encuentra en los hospitales, unidos de la llave del suministro de oxígeno.

Una modificación de este modelo permite medir la capacidad de pulmonar de una persona que haya sufrido alguna lesión recogiendo una exhalación a través de un adaptador para los labios.

1.4.3.2 Tubo Venturi

Consiste en un tubo dispuesto de manera horizontal que presenta en su punto medio una reducción de su diámetro para generar una variación de velocidad y presión. Si en esta estructura se colocan dos sensores de presión se puede deducir la velocidad y por tanto el flujo de aire dentro del tubo.

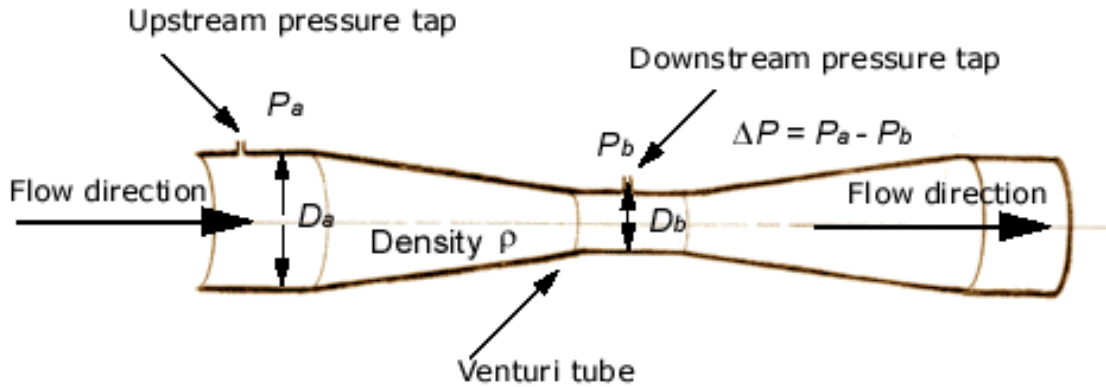


Figura 1.4 TUBO VENTURI

Como el flujo de aire es constante en todo el tubo, cuando el fluido pasa por el punto medio se acelera y regresa a su velocidad inicial cuando se estabiliza el flujo.

1.4.3.3 Tubo Pitot

A diferencia del sensor anterior que atrapa todo el flujo, el tubo Pitot es un sensor que capta una pequeña parte del flujo de aire y lo transmite a través de una deformación en U para empujar un fluido de densidad distinta y variar su altura. [7]

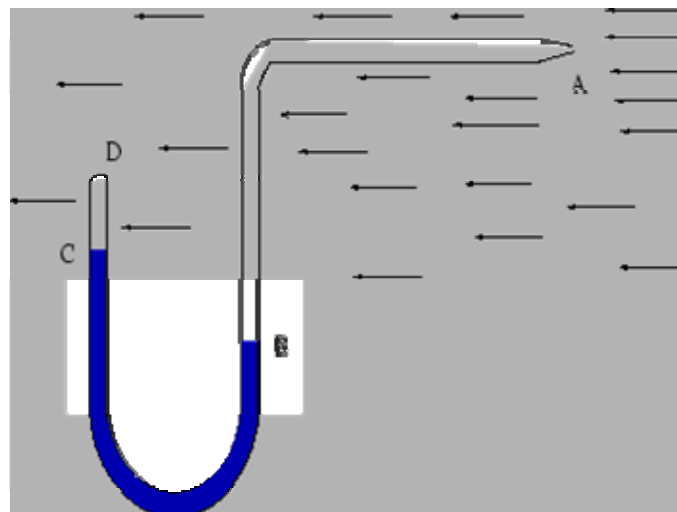


Figura 1.5 TUBO PITOT

⁷<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iedinzo/Sensores%20y%20Transmisores.ppt>.

En los puntos A y D existe una presión estática que difiere de la presión de impacto en el punto B. Mientras mayor sea la velocidad del fluido mayor será la presión de impacto y la diferencia de altura entre B y C crecerá.

1.4.3.4 Sensor de placa orificio

La fórmula fundamental de los elementos de presión diferencial se basan en la Ecuación de Bernoulli en una tubería horizontal, de la siguiente manera:

$$\frac{V_a^2}{2 \cdot g} + \frac{P_a}{\omega_o} = \frac{V_c^2}{2 \cdot g} + \frac{P_c}{\omega_o}$$

Ec. 3.2

Donde:

V_a : velocidad antes de restricción.

V_c : velocidad en restricción.

g : aceleración de la gravedad.

P_a : presión antes de restricción.

P_c : presión en restricción.

ω_o : peso específico del fluido.

Llamando m a la relación entre la sección de la tubería y la sección de la placa orificio. En la siguiente ecuación se expresa el caudal en volumen.

$$Q_v = S_c \cdot \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(\frac{P_a - P_c}{\omega_o} \right)}$$

Ec. 4.3

Siendo h la presión diferencial producida por el elemento y k una constante que dependerá de los valores de sección de la placa orificio.

$$k \cdot Q_v^2 = h$$

Ec. 5.4

Se puede observar que la relación entre la presión diferencial y el caudal, es cuadrática. [8]

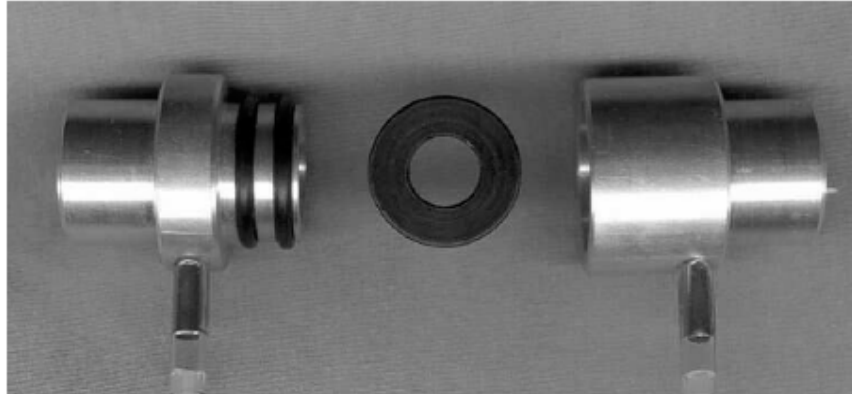
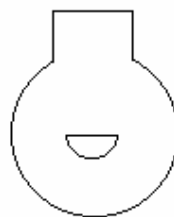


Figura 1.6 SENSOR TIPO PLACA ORIFICIO

Este sensor es muy preciso y requiere de poco mantenimiento pero tiene un rango limitado de medición y además la placa provoca una caída de carga.

1.4.3.5 Sensor de orificio variable

Es similar al anterior y se diferencia solamente en que ahora se coloca una aleta móvil en el orificio que lo cubre. Esta implementación se la realiza con la finalidad de linealizar el flujo pero trae consigo la desventaja de que se requiera cambiar periódicamente la aleta por lo que aumenta la frecuencia de mantenimiento.



**Aleta
Semicerrada**

Figura 1.7 SENSOR CON ORIFICIO VARIABLE

⁸http://sabi.org.ar/anales/cd_2005/pdf/105E1.pdf.

1.4.3.6 Neumotacógrafo de Fleish

Consiste en un conjunto de tubos capilares que suministran una resistencia fija y pequeña al flujo de aire. Pequeñas aperturas en cada extremo de los tubos capilares se utilizan para medir la diferencia de presión creada cuando el flujo de aire pasa a través del dispositivo.

Para explicar el principio de funcionamiento se debe estudiar la Ley de Poiseuille. Sean dos capas de gas de área S que distan dx y entre las cuales existe una diferencia de velocidad dv .

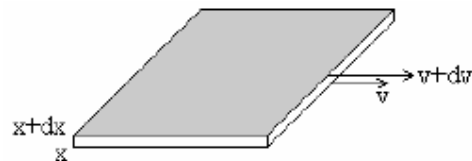


Figura 1.8 DIFERENCIAL DE GAS

La fuerza por unidad de área que hay que aplicar es proporcional al gradiente de velocidad. La constante de proporcionalidad se denomina viscosidad η .

$$\frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{dv}{dx}$$

Ec. 6.5

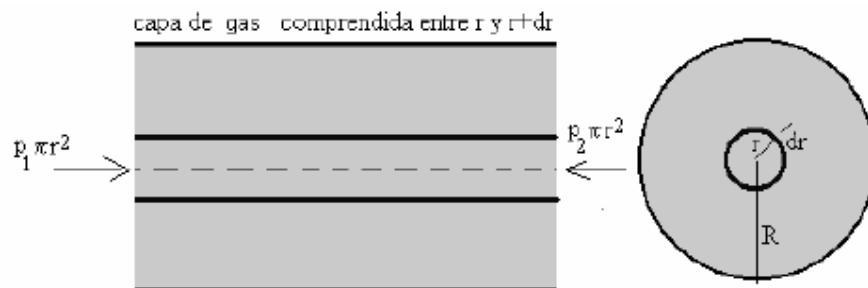


Figura 1.9 CAPA DE GAS

Considerando un gas que circula en régimen laminar por una tubería de radio interior R , y de longitud L , bajo la acción de una fuerza debida a la diferencia de presión existente en los extremos del tubo.

$$F = (P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2 \quad \text{Ec. 7.6}$$

Sustituyendo F en la ecuación 1.5 y teniendo en cuenta que el área A de la capa es ahora el área lateral de un cilindro de longitud L y radio r .

$$\frac{(P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L} = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \quad \text{Ec. 8.7}$$

Integrando esta ecuación de ambos lados se obtiene

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4 \cdot \eta \cdot L} \cdot (R^2 - r^2) \quad \text{Ec. 9.8}$$

Esta ley describe la relación entre el caudal gaseoso por el tubo y la presión diferencial. Para convertir esta señal de presión en una señal eléctrica se utilizan transductores de presión. [9]



Figura 1.10 NEUMOTACÓGRAFO DE FLEISH

⁹<http://www.nib.fmed.edu.uy/Seminario%202006/Trabajos%20estudiantes%202006/Ashby,%20Inacio.pdf>.

1.4.3.7 Neumotacógrafo de Lilly

El funcionamiento obedece a las mismas ecuaciones que el anterior sensor pero en éste se sustituyen los tubos capilares por membranas. A ambos sensores se los suele llamar también sensores de pantalla.

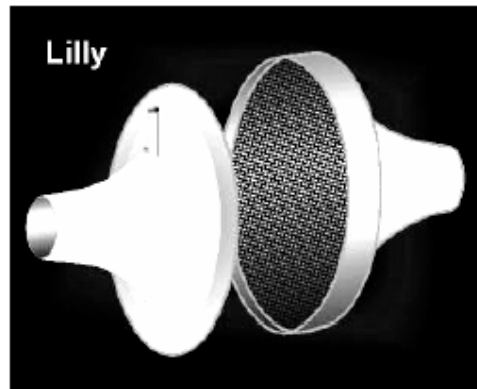


Figura 1.11 NEUMOTACÓGRAFO DE LILLY

Presentan buena respuesta en frecuencia y son fáciles de desarmar, pero requieren mantenimiento periódico para evitar que la humedad y las secreciones lo obstruyan.

1.4.3.8 Sensor universal vortex

Su nombre viene de los vórtices creados por una obstrucción chata en la corriente del flujo. La operación del sensor está basada en el principio de pérdida vortex. Cuando un fluido se mueve alrededor de un cuerpo, se forman vórtices y se mueven rápidamente. Estos se forman alternativamente de un lado a otro causando fluctuaciones de presión. La frecuencia y el grado de turbulencia de los vórtices creados son directamente proporcionales a la velocidad de flujo, y por tanto a la frecuencia del flujo.

Las variaciones de presión son detectadas por un cristal piezoeléctrico que genera una señal de voltaje que varía con la misma frecuencia que la del derramamiento del vórtice. Estos resultados son extremadamente precisos y

repetibles sin partes móviles problemáticas que frecuenten el mantenimiento del sensor.

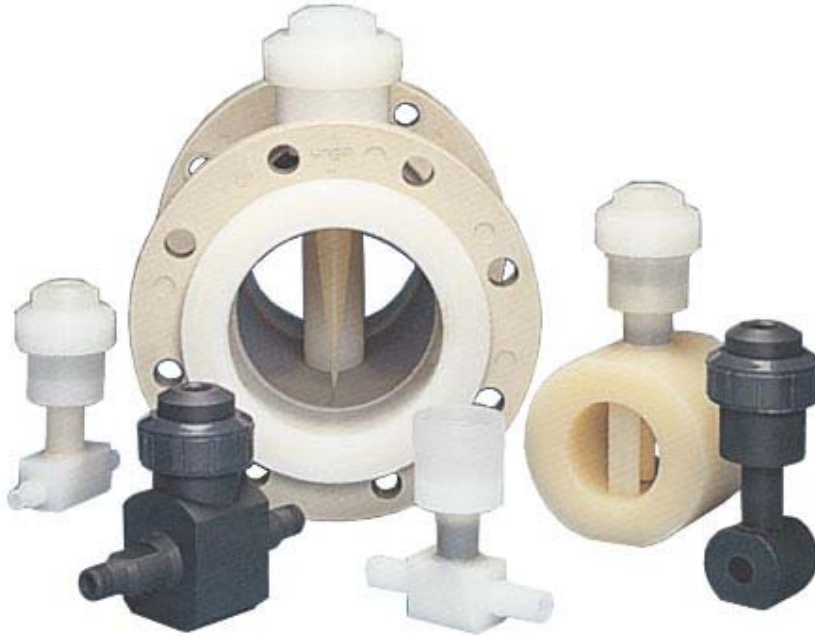


Figura 1.12 SENSORES UNIVERSALES DE VORTEX

1.4.4 MÉTODO TÉRMICO

Los sensores de flujo térmicos se basan en el intercambio de calor de dos cuerpos diferentes para alcanzar el equilibrio térmico.

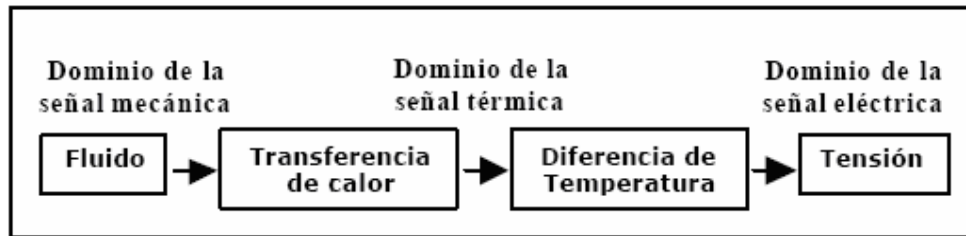


Figura 1.13 DIAGRAMA DEL MÉTODO TÉRMICO

Pueden ser clasificados en tres tipos fundamentales:

1. Sensores de flujo de alambre o capa caliente.
2. Sensores de flujo calorimétricos.

3. Sensores de flujo según tiempo de vuelo.

Existen tres técnicas de control, tales como: CCA (Anemómetro de Corriente Constante), CVA (Anemómetro de Voltaje Constante) y CTA (Anemómetro de Temperatura Constante).

1.4.4.1 Sensores de alambre o capa caliente

El funcionamiento de estos sensores se basa en un hilo generalmente de platino o tungsteno el cual es calentado a temperatura constante por la corriente provista por un circuito electrónico. El gas que pasa enfría el hilo, el cual obliga al circuito a proveer mayor corriente para mantener la temperatura. La corriente entregada es proporcional al flujo del gas.

Considerando un cable inmerso en un flujo de gas, entonces la potencia eléctrica entregada al cable es igual al calor disipado en el cable por convección térmica.

$$I^2 R_w = h A_w (T_w - T_g) \quad \text{Ec. 10.9}$$

Siendo:

I : Corriente.

R_w : Resistencia del cable.

A_w : Área de la superficie del cable.

T_w : Temperatura del cable.

h : Coeficiente de convección.

La resistencia del cable varía como:

$$R_w = R_{ref} (1 + \alpha (T_w - T_{ref})) \quad \text{Ec. 11.10}$$

Siendo:

α : Coeficiente de la resistencia

R_{ref} : La resistencia del cable cuando la temperatura es T_{ref} .

El coeficiente de convección h es función de la velocidad del fluido, de acuerdo a la Ley de King.

$$h = a + b.v^c \quad \text{Ec. 12.11}$$

Donde a , b y c son coeficientes que se obtienen de la calibración y v la velocidad del gas.

Combinar las tres ecuaciones anteriores permite eliminar el coeficiente h .

$$a + b.v^c = \frac{I^2.R_w}{A_w(T_w - T_g)} \quad \text{Ec. 13.12}$$

Como la temperatura del hilo puede ser medida entonces esto permite obtener una expresión de la velocidad del gas en función únicamente de la corriente.

También son conocidos como sensores de flujo de masa térmica y miden el efecto del fluido en movimiento sobre un elemento sobrecalentado.



Figura 1.14 SENSOR DE HILO CALIENTE

Típicamente el diámetro varía entre $4\ \mu\text{m}$ y $10\ \mu\text{m}$ y el largo es de alrededor de 1 mm. Los sensores comerciales tienen una respuesta en frecuencia que puede variar entre 10 kHz y 400 kHz.

La principal ventaja que presenta este tipo de sensores es la muy baja resistencia al flujo, rápida respuesta, escaso desgaste y mantenimiento nulo. La desventaja es que es muy sensible a la humedad, y que son afectados por las turbulencias.

1.4.4.2 Sensores calorimétricos

En estos dispositivos se mide cómo cambia el perfil térmico alrededor de un elemento calefactor, modulado por el fluido en movimiento. La respuesta es más rápida, es más sensible a flujos pequeños y tiene más repetibilidad que en el anterior caso.

Para evitar errores de lectura por cambios ambientales se hace un lazo cerrado de control de temperatura (con un puente de Wheatstone) para mantener el diferencial de temperatura constante y el valor de flujo es proporcional a la potencia que consume para mantener constante la lectura de los sensores de temperatura del otro puente.

Es muy utilizado para bajas presiones ya que en este rango tiene mucha precisión.

1.4.4.3 Sensores según el tiempo de vuelo

Es de gran simplicidad y consiste en medir el tiempo que toma un pulso térmico provocado en recorrer una distancia conocida.

1.4.5 MÉTODO ACÚSTICO

Estos sensores miden el tiempo que tarda un pulso de sonido en viajar en la dirección del flujo y lo comparan con el tiempo que tarda el mismo pulso de sonido en la dirección inversa. Para estas mediciones es necesario instalar los dos sensores en distintas partes del conducto. Se trata de un método no intrusivo, con componentes fácilmente accesibles y precisión estable en un amplio intervalo de caudales.

Consta de unas sondas, que trabajan por pares, como emisor y receptor. La placa piezo-cerámica de una de las sondas es excitada por un impulso de tensión, generándose un impulso ultrasónico que se propaga a través del medio a medir, esta señal es recibida en el lado opuesto de la conducción por la segunda sonda que lo transforma en una señal eléctrica.

El convertidor de medida determina los tiempos de propagación del sonido en sentido y contrasentido del flujo en un medio líquido y calcula su velocidad de circulación a partir de ambos tiempos. Y a partir de la velocidad se determina el caudal que además necesita alimentación eléctrica.

Hay dos tipos de medidores de flujo por ultrasonido: sensor Doppler y sensor de tránsito.

1.4.5.1 Sensores Doppler

Se basan en el efecto Doppler, enuncia que las ondas reflejadas por cuerpos en movimiento adquieren un corrimiento en su frecuencia en una cantidad proporcional a la velocidad del objeto.

La frecuencia que percibirá el observador se puede hallar en la siguiente relación.

$$f_0 = f_f \cdot \frac{v \pm v_0}{v \pm v_f}$$

Ec. 14.13

Donde:

f_0 : Frecuencia del observador.

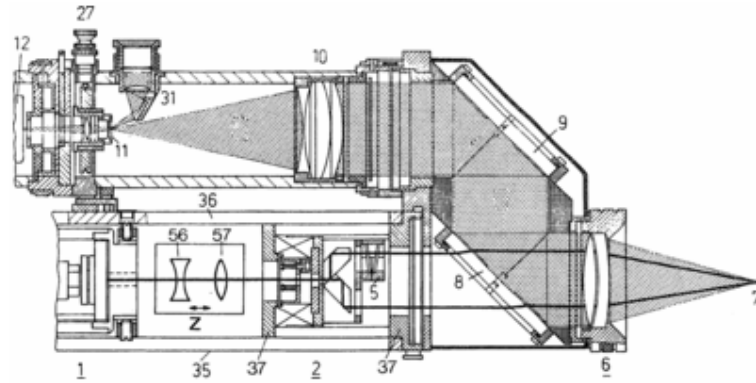
f_f : Frecuencia de la fuente.

v : Velocidad del sonido.

v_f : Velocidad de la fuente.

Este tipo de sensores miden los cambios de frecuencia causados por el flujo. Se colocan dos sensores cada uno a un lado del flujo a medir y se envía una señal de frecuencia conocida a través del mismo. Las discontinuidades en el flujo hacen que el pulso enviado se refleje, pero como el flujo que causa la reflexión se está moviendo la frecuencia del pulso que retorna también cambia y ese cambio de frecuencia será proporcional a la velocidad del aire.

Existe una variación de este sensor que utiliza un rayo de luz láser en lugar de una onda de sonido.



Drawing of a laser anemometer. The laser is emitted (1) through the front lens (6) of the anemometer and is backscattered off the air molecules (7). The backscattered radiation (dots) re-enter the device and are reflected and directed into a detector (12).

Figura 1.15 ANEMÓMETRO DE LÁSER

La ventaja de usar este sensor es que es muy preciso y la desventaja más importante es que tiene una resistencia apreciable.

1.4.5.2 Sensores de tránsito

Tienen transductores colocados a ambos lados del flujo. Su configuración es tal que las ondas de sonido viajan entre los dispositivos con una inclinación de 45 grados respecto a la dirección de flujo.

La velocidad de la señal que viaja entre los transductores aumenta o disminuye con la dirección de transmisión y con la velocidad del flujo que está siendo medido. Se tienen dos señales que viajan por el mismo elemento, una a favor de la corriente y otra en contra de manera que las señales no llegan al mismo tiempo a los dos receptores.

Se puede hallar una relación diferencial del flujo con el tiempo transmitiendo la señal alternativamente en ambas direcciones. La medida del flujo se realiza determinando el tiempo que tardan las señales en viajar por el flujo.



Figura 1.16 SENSOR ULTRASÓNICO DE TRÁNSITO^[10]

1.5 SENSORES MÁSSICO TÉRMICOS DE FLUJO DE AIRE

1.5.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

En el proceso de transducción de señales para un sensor de flujo de principio térmico de propósito general se presentan varios pasos, desplazándose desde el dominio de las señales mecánicas, pasando por el térmico hasta llegar al eléctrico.

Desde el punto de vista mecánico se debe tener en cuenta la relación que existe entre el fluido que se desea medir y el comportamiento de éste en la cercanía del sensor. Esto determinará aspectos relacionados con el montaje del sensor, la forma de su empaquetamiento y su ubicación final para una aplicación determinada.

El aspecto térmico debe considerar el mecanismo de intercambio de calor entre el flujo local y el sensor. Éste también está relacionado con los diferentes modos de operación que pueden ser utilizados, por ejemplo la medición de temperatura,

¹⁰ <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:WindMaster.jpg>.

gradiente de temperatura o mediciones de potencia. De igual manera, deben considerarse los efectos térmicos que pueden interferir o limitar la medición como pérdidas de calor no deseadas a través de las conexiones y puntos de soporte.

En relación con la parte electrónica, se debe considerar la exactitud, sensibilidad y fiabilidad en la generación de una señal eléctrica representativa del efecto térmico inducido por el flujo a medir. Esta parte también incluye el procesamiento adecuado de las señales medidas y la presentación y visualización del resultado.

1.5.2 PRINCIPIO FÍSICO DE MEDICIÓN

En un elemento sobrecalentado ocurren tres procesos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. El proceso de conducción se refiere a la transferencia de calor por contacto de un material sólido o de un fluido sin movimiento; la convección es la transferencia de calor que se establece por el movimiento del fluido o gas y la radiación es la transferencia de calor por la emisión de ondas electromagnéticas.

Existen dos procesos de convección: la convección libre o natural y la convección forzada. La primera se establece cuando a través de un fluido aparecen gradientes de temperatura que provocan movimiento y por tanto transferencia de calor, en cambio la convección forzada se establece cuando un fluido es notoriamente forzado a moverse por un agente externo y por esta razón se produce transferencia de calor.

En los sensores térmicos de flujo de aire se manifiestan los tres procesos de transferencia de calor. Sin embargo, el principio activo que debe primar para que la transducción proyecte resultados satisfactorios es el de la convección térmica forzada, de forma que este proceso sea determinado por el movimiento del fluido.

El proceso de conducción debe ser minimizado para lograr equipos con bajos niveles de consumo de potencia y sobretodo que sean energéticamente eficientes. Los diseños también deben atenuar la transferencia de calor por

radiación que se produce al operar los elementos sobrecalentados a temperaturas muy altas. Adicionalmente, se deben lograr sensores de flujo de tamaño reducido.

Los dos tipos de transferencia de calor por convección se manifiestan en el elemento calefactor del sensor térmico de flujo. Se puede notar que el elemento calefactor crea un flujo convectivo natural hacia arriba y por esto, su diseño debe disminuir este efecto. Mientras más grande sean las dimensiones del elemento sensor sobrecalentado y mayor sea la diferencia de temperatura de éste con la del fluido, mayor será el flujo por convección natural.

Este efecto puede tener una influencia negativa especialmente en las mediciones a baja velocidad. Sin embargo, al reducir el área de contacto del elemento sensor con el fluido también disminuye el efecto de la convección forzada que se desea. Por otra parte, operándolo a temperaturas no muy elevadas disminuye la respuesta temporal y la exactitud de las mediciones.

Por lo tanto, en el diseño de un sensor másico térmico de flujo de aire se debe buscar la solución más coherente entre todos estos factores.

1.5.3 MODOS DE OPERACIÓN

Los sensores de flujo por principio térmico pueden ser operados en diferentes modos pero los más utilizados son en el que se mantiene constante la potencia que se disipa en el sensor y en el que éste es mantenido a una temperatura constante.

1.5.3.1 Operación a voltaje constante

Conocida también como CVA (Constant Voltage Anemometer), constituye la técnica de control más sencilla ya que consiste en aplicar un voltaje fijo a los terminales del calefactor sin importar las variaciones de flujo y por tanto de temperatura de ambos.

Esta facilidad para el control del calefactor se compensa luego con la relativa complejidad para interpretar los datos de temperatura.

1.5.3.2 Operación a corriente constante

A esta técnica de control se la conoce como CCA (Constant Current Anemometer). Cuando se opera bajo este principio, al incrementarse la velocidad del fluido disminuye la temperatura del sensor y esta variación determina la lectura del mismo. Esto se implementa en la práctica manteniendo una corriente constante y aplicando una corrección de tensión para mantener la potencia fija.

Este método tiene la ventaja de una sencilla implementación electrónica. Su desventaja fundamental está en que, debido a la variación de la temperatura del sensor, la sensibilidad a la temperatura del sensor y las propiedades del fluido deben ser tomadas en cuenta. La velocidad de respuesta del sensor está limitada por su capacidad térmica.

1.5.3.3 Operación a temperatura constante

En el principio de temperatura constante (CTA: Constant Temperature Anemometer) se emplea un lazo de control que mantiene constante la diferencia de temperatura entre el elemento sobrecalentado y el fluido. Midiendo la potencia que se consume para mantener esta desigualdad constante se determina la velocidad del fluido.

La figura 1.17 muestra el esquema circuital básico empleado para este modo (se ha considerado un coeficiente térmico de resistencia negativo). En este, mediante realimentación negativa se mantiene constante la temperatura del elemento calefactor (Rh), que tiende a disminuir al incrementarse la velocidad del fluido.

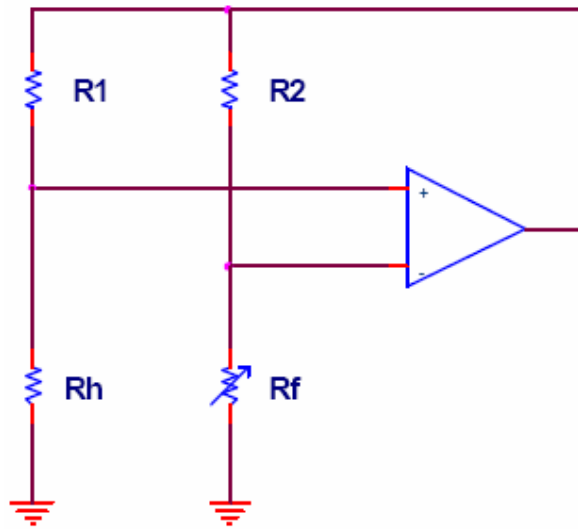


Figura 1.17 CONFIGURACIÓN CIRCUITAL BÁSICA PARA CTA

Cabe recalcar que no se mantiene constante la temperatura absoluta del calefactor sino el valor diferencial entre éste y la temperatura del fluido. Por esta razón, se requiere un elemento sensor de referencia (R_f) que debe tener el mismo coeficiente térmico de resistencia que el resistor calentado.

Por ejemplo, cuando el fluido aumenta la temperatura del sensor sube así como su valor R_f y por tanto el voltaje en el terminal negativo del amplificador operacional y de la misma manera en el positivo, esto hace que la potencia en el calefactor aumente y se compense la caída de temperatura del calefactor.

Es necesario mencionar que el tipo de realimentación del circuito depende de la disposición física de los sensores y del coeficiente térmico de resistencia del sensor y del calefactor.

El elemento de referencia se opera a baja potencia para que posea la misma temperatura del fluido. Los sensores operados bajo este principio mejoran la velocidad de respuesta.

1.5.4 COMPENSACIÓN POR LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

Normalmente la calibración de los anemómetros es hecha a una temperatura diferente a la que son posteriormente operados por lo que se requiere una corrección en su lectura de acuerdo con las variaciones de la temperatura del aire. Estudios realizados por diferentes autores muestran que los anemómetros térmicos para bajas velocidades pueden ser diseñados de forma tal que el impacto de la corrección térmica en la exactitud de las mediciones sea menor del 1 % / °C si la temperatura del aire se mantiene entre los 15 y 35 °C.[¹¹]

El tiempo de respuesta del sensor empleado como referencia de la temperatura del fluido en la medición de la velocidad del aire no está normado en los estándares actuales. Mayoritariamente es seleccionado por los fabricantes de forma que sea mucho mayor que el del elemento sensor de la velocidad del aire.

Otros estudios han demostrado que la exactitud de la medición de la velocidad media del aire no es afectada significativamente por las fluctuaciones de la temperatura del aire, si la desviación estándar de este parámetro es menor que 0,5 °C.

1.6 ELABORACIÓN DE SENSORES INDUSTRIALES DE FLUJO DE AIRE

La medición de la velocidad de desplazamiento de los fluidos ha sido ampliamente estudiada por su aplicación en diferentes campos, desde la medición del flujo de líquidos y gases en procesos industriales hasta la optimización de la forma de las alas de las aeronaves.

Dentro del grupo de sensores para la medición de dicha variable se destacan los sensores de flujo de principio térmico. Y para este tipo de sensores se han desarrollado técnicas de micromaquinado que brindan propiedades tales como:

¹¹ MELIKOV, A. K.: "Requirements and Guidelines for Low Velocity Measurements", ASHRAE Transactions, Vol. 104, pp. 1529-1539, 1998.

miniaturización, disminución del tiempo de respuesta y aumento de la sensibilidad.

Para el año 2000 se estimaba que los dispositivos micromaquinados para la medición de flujo consumirían el 19 % del mercado total de dispositivos comercializados, lo que muestra las ventajas de emplear esta tecnología para construir estos transductores.

El primer sensor térmico de flujo basado en el empleo de tecnología de silicio fue reportado por la Universidad Tecnológica de Delft en 1974. En la actualidad se encuentran tanto sensores de flujo implementados con micromaquinado de volumen como con micromaquinado superficial, aunque predominan los primeros.

La estructura básica de un sensor de micromaquinado superficial consiste en una membrana sobre la que se ubican sensores de temperatura simétricamente distribuidos y un pequeño calefactor que se encarga de crear un perfil térmico a través de la membrana. El comportamiento térmico se modifica al exponer la membrana a un flujo y midiendo las variaciones de la temperatura entre los elementos sensores y de esta manera se puede determinar la velocidad del fluido.

Utilizar técnicas de micromaquinado es ventajoso para construir pequeñas estructuras que se sobrecalientan con bajas potencias aplicadas, lo que se logra disminuyendo su masa térmica y aislándolas del substrato y por tanto, minimizando las pérdidas de calor por conducción hacia éste.

Las partículas de polvo constituyen un aislamiento térmico pero la estructura del microchip de algunos fabricantes produce un efecto termoforético que repele las partículas; sin embargo en los filamentos se puede asentar el polvo y para esto se recomienda usar filtros de 5 micrómetros en serie en el lado de ingreso del flujo.

Las estructuras empleadas en los sensores de flujo térmico se pueden clasificar en cuatro grupos:

- a. Membranas cerradas. Su desventaja radica en que es obligatorio procesar la oblea de silicio por ambas caras consumiendo mucho material y tiempo.
- b. Membranas o láminas suspendidas. Estas requieren de largas barras voladizas para su sujeción y largos tiempos para el proceso de sacrificio.
- c. Vigas voladizas. Su principal desventaja está en las deformaciones fuera del plano de medición que pueden ocurrir provocadas por el gradiente del esfuerzo residual remanente en el material estructural.
- d. Puentes. Estos poseen poca área de intercambio y pueden presentar deformaciones por pérdida de estabilidad si el material empleado presenta altos valores de esfuerzo residual compresivo.

La tecnología MUMPS (multi-user MEMS processes) es un servicio comercial multiusuario para la producción de prototipos MEMS utilizando micromaquinado superficial. Está concebido para micromaquinado de propósito general y admite la inclusión de diferentes diseños, de usuarios independientes, sobre una misma oblea. Las reglas de diseño establecidas son conservadoras para garantizar un alto nivel de rendimiento. Su origen se basa en un proceso desarrollado en el Berkeley Sensors and Actuators Center (BSAC) en la Universidad de California a finales de los años ochenta. [12]

Una búsqueda bibliográfica sobre este proceso revela que ha sido utilizado ampliamente por diferentes universidades del mundo para la producción de prototipos. La mayoría de las aplicaciones reportadas con esta tecnología corresponde a dispositivos electromecánicos y optomecánicos.

Con el objetivo de confeccionar sensores de flujo de aire de tipo industrial, es decir más robustos, se ha experimentado con varios tipos de materiales para el

¹² <http://revistas.mes.edu.cu:9900/EDUNIV/03-Revistas-Cientificas/Ingenieria-Electronica-Automatica-y-Comunicaciones/2003/3/10303310.pdf>.

armazón de los mismos. Entre los principales se tienen: latón, acero, aluminio, acero inoxidable, cromo, teflón y pocan.

1.7 sensores básicos de flujo de aire en el mercado

Cuando los fabricantes de sensores son consultados por sus productos, ellos suelen realizar una gran cantidad de preguntas al cliente para determinar el ejemplar que favorezca de mejor manera el requerimiento particular. En ese cuestionario se incluye una pregunta clave que consiste en detallar la finalidad de la medición, es decir si el sensor será utilizado para cuantificar la variable o para realizar control.

A pesar de que ambos sensores miden una variable, los que presentan valores de la magnitud necesariamente deben ser más exactos y estables que los utilizados en control ya que en este último caso el control tiene una banda de tolerancia en torno a un punto predeterminado (*Set Point*).

En relación a esto, los sensores básicos térmicos utilizados para medir flujo son exclusivamente los de hilo caliente que han sido construidos con técnicas de micromaquinado y los sensores calorimétricos de mayor tamaño son utilizados como interruptores ON/OFF con histéresis.

En la figura 1.18 se muestran dos tipos de sensores comerciales micromaquinados para medición.



Figura 1.18 SENSORES COMERCIALES DE FLUJO DE AIRE

1.8 APLICACIONES DE SENSORES DE FLUJO DE AIRE EN LA INDUSTRIA

El aire es el elemento más usado en la industria ya que se encuentra presente en casi todos los procesos, ya sea como fuente de energía (aire comprimido), variable directa (procesos aeróbicos), indirecto (combustión) o producto final (aire acondicionado).

Entre las principales aplicaciones del sensor de flujo de aire se tienen las siguientes:

- Medición de la cantidad de aire que ingresa a un motor de combustión interna.
- Controles periódicos de funcionalidad, en campo, a equipos médicos tales como respiradores artificiales, ventiladores neonatales y mesas de anestesia.
- Control de humedad para calefacción, ventilación y sistemas de aire acondicionado.
- Analizadores de gas.
- Control de vacío.
- Control de procesos.

- Concentradores de oxígeno.
- Equipos de detección de fugas.
- Campanas extractoras.
- Cromatografía de gases.
- Purificadores de aire.
- Deshumidificadores

1.9 SENSOR Y TRANSMISOR MICROPROCESADO PARA FLUJO DE AIRE

El presente proyecto consiste en el diseño y construcción de un sensor de flujo de aire basado en el método de medición másico térmico. Para esto se utiliza un elemento calefactor ubicado entre dos sensores de temperatura.

El aire en movimiento primero circula por la cercanía del primer sensor, luego pasa por el elemento calefactor produciéndose transferencia de calor y finalmente rodea el segundo sensor de temperatura. Los valores medidos por los sensores de temperatura son diferentes mientras varía el flujo de aire. De esta manera se cuantifica la velocidad y el flujo de aire partiendo de la diferencia de temperatura entre ambos sensores.

Las señales de los sensores de temperatura son acondicionadas y enviadas a un microcontrolador PIC que procesa los datos y presenta salidas normalizadas de corriente, voltaje y RS-232.

El transmisor cuenta con pulsantes que permiten parametrizar la visualización del mismo; a través de un LCD se presentan los valores de diferencia de temperatura, velocidad y flujo de aire; además la velocidad y el flujo de aire se puede apreciar en unidades de medida de dos sistemas de medida diferentes.