

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA.

**MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE DE ADMISIÓN EN UN MOTOR A
COMBUSTIÓN INTERNA INSTALADO EN UN FRENO DINAMOMÉTRICO
DE BANCO.**

**Trabajo de Titulación para optar al
Título de TÉCNICO
UNIVERSITARIO en
MECÁNICA AUTOMOTRIZ.**

Alumnos:

Daniel Cristóbal Soto Rivera.

Eduardo Fabricio Ponce Costa.

Docente: Roberto Leiva I.

RESUMEN

Los motores alternativos a combustión interna equipan medidores de flujo de aire los cuales son equipos diseñados para originar una señal que puede medirse y relacionarse con la cantidad de caudal y flujo másico. El aire que circula por la admisión es muy importante ya que con la lectura del flujo de este se puede generar la proporción aire-combustible, ideal para cada régimen del motor.

La finalidad de este trabajo de título es instalar dos flujómetros de aire de admisión en un motor a combustión interna, para realizar mediciones de flujo másico de aire en un freno dinamométrico de banco en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). Dicho motor no posee ningún sensor de flujo de aire, por lo cual se realizará la instalación de un MAF (mass air flow sensor / sensor de flujo másico de aire) tipo hilo caliente y un tubo annubar (tubo Pitot). Es por esto, que se hace necesario implementar en el laboratorio de freno dinamométrico de banco, los equipos e instrumentos necesarios para realizar las mediciones y ensayos correspondientes de flujo de aire, se pretende determinar el desempeño que pueden tener estos sensores en el motor, verificando cuál resulta más adecuado para ser utilizado en el ámbito automotriz los ensayos que se le podrían aplicar a estos sensores pueden ser ensayos de flujo de aire, rendimiento volumétrico, RAC entre otros ensayos.

Para lo anterior, el presente trabajo se organiza de la siguiente manera:

En el capítulo I se describe el estado del arte de los medidores de flujo de aire, junto a la importancia que éste posee en un motor instalado en un freno dinamométrico de banco, abordando la física del aire, el funcionamiento de los sensores y composición. A su vez, se exponen los diferentes tipos de sensores existentes y sus rangos específicos, destacando que no sólo son para el área automotriz, sino que también, para uso industrial.

En el capítulo II se expone cómo se instaló el tubo annubar y MAF de tipo hilo caliente en el motor. Se evidencia el funcionamiento y los rangos de dichos sensores para saber si son adecuados para el motor, para ello se efectuaron las calibraciones correspondientes para el instrumento de medición (tubo annubar).

Finalmente, en el capítulo III se efectuaron los ensayos con los sensores mencionados anteriormente, así como se presentan las conclusiones y recomendaciones sobre los valores que proporcionaron los medidores. Asimismo, se elaboró una guía para que alumnos en un futuro puedan desarrollar dicha actividad en clases de laboratorio, contando con un instrumento que no es utilizado precisamente en el ámbito automotriz.

La realización de estos ensayos nos permitirá concluir que al realizar una calibración es muy importante contar con un instrumento patrón calibrado para ello, esto afectara directamente en los resultados obtenidos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1 :	15
ESTADO DEL ARTE DE LOS INSTRUMENTOS PARA MEDIR FLUJO DE AIRE EN UN MOTOR ALTERNATIVO DE COMBUSTIÓN INTERNA INSTALADO EN UN FRENO DINAMOMETRICO DE BANCO.	15
1.1 FÍSICA DEL AIRE PARA REALIZAR MEDICIONES DE FLUJO DE AIRE DE ADMISIÓN, EN UN MOTOR A COMBUSTION INTERNA.	17
1.2 MEDIDORES DE FLUJO DE AIRE Y SUS TIPOS.	18
1.3 UTILIZACIÓN DE LOS MEDIDORES DE AIRE DE ADMISIÓN EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA.....	21
1.4 COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR MAF.....	23
1.4.23MAF de tipo hilo caliente:	23
1.4.25MAF Karman vortex:.....	25
1.4.3 MAF tipo paletas sensor:	26
1.5 COMPOSICION Y FUNCIONAMIENTO DEL TUBO PITOT Y ANNUBAR..	30
1.5.1	30
Tubo de Pitot.....	30
1.5.2 El tubo annubar.....	33
CAPITULO 2 :	37
INSTALACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AIRE DE ADMISIÓN EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA INSTALADO EN UN FRENO DINAMOMÉTRICO.	37
2.1 REQUERIMIENTOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SENSORES DE FLUJO MÁSIICO DE AIRE PARA LA INSTALACIÓN EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA.	39
2.1.1 Circuito interior del MAF tipo hilo caliente:	41
2.2 SELECCIÓN, ADQUISICIÓN E INSTALACIÓN DE UN SENSOR MAF DE TIPO HILO CALIENTE Y UN TUBO ANNUBAR EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA	42
2.2.1 Instalación del tubo annubar.	42
2.2.2 Instalación del sensor MAF tipo hilo caliente.	44
2.3 ESQUEMA DEL SISTEMA.....	47
2.4 PROCESO DE CALIBRACION DE TUBO ANNUBAR Y MAF TIPO HILO CALIENTE.	48
2.4.1 Paso a paso del procedimiento realizado por el proveedor	51
2.5 ELABORACIÓN DE UN CIRCUITO INTEGRADO PARA LA LECTURA DEL SENSOR MAF TIPO HILO CALIENTE.	55

2.6 ELABORACIÓN DE UN REDUCTOR DE FLUJO DE AIRE PARA EL ANNUBAR.	57
CAPITULO 3 :	59
ENSAYOS CON EL MEDIDOR DE AIRE ADMISIÓN SOBRE UN MOTOR INSTALADO EN UN FRENO DINAMOMETRICO DE BANCO.	59
3.1 GUÍA DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE.	61
3.2 PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE.	63
3.3 PROCEDIMIENTO PARA LLEVAR A CABO EL ENSAYO DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE EN UN MACI.	64
3.3.1 Procedimiento para llevar a cabo la medición de flujo de combustible.	64
3.4 PARAMETROS A MEDIR Y A CALCULAR EN EL ENSAYO DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE	65
3.5 ENSAYOS REALIZABLES CON LA MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE.	66
3.5.1 Ensayo de RAC.	67
3.5.2 Ensayo de rendimiento volumétrico.	67
3.5.3 Ensayo de consumo de aire.	68
3.6 ENSAYOS REALIZADOS CON LOS MEDIDORES DE AIRE DE ADMISIÓN.	68
3.6.1 Discusión de los resultados de los ensayos.	71
3.6.2 Temas relacionados con el ensayo de medición de flujo de aire.	73
CONCLUSIÓN	75
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	79

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1-1 Esquema de los componentes del sensor MAF tipo hilo caliente.
- Figura 1-2. Esquema electrónico y señal del MAF Karman Vortex.
- Figura 1-3. Esquema composición de MAF tipo paletas.
- Figura 1-4. Esquema de tubo Pitot
- Figura 1-5. Diagrama del tubo Pitot y su funcionamiento
- Figura 1-6. Diagrama de tubo Pitot y sus presiones
- Figura 1-7. Composición del tubo annubar
- Figura 2-1. circuito interno del sensor MAF tipo hilo caliente.
- Figura 2-2. adaptación de acople reductor.
- Figura 2-3. Ubicación de conexión del tecalan.
- Figura 2-4. instalación del tubo annubar en el porta filtro.
- Figura 2-5. Instalación del sensor MAF tipo hilo caliente en el tubo adaptador.
- Figura 2-6. Instalación del sensor MAF tipo hilo caliente en el sistema de admisión.
- Figura 2-7. Circuito de conexión entre el sensor MAF hilo caliente y el circuito integrado.
- Figura 2-8. Inicio de programa Sáenz.
- Figura 2-9. Software SMAC.
- Figura 2-10. Identificación de auxiliar.
- Figura 2-11. Identificación del sensor de presión.
- Figura 2-12. Reductor para tubo annubar.
- Figura 2-13. Instalación del reductor en el tubo annubar.

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1-1. Distintos tipos de medidores de flujo de aire.
- Tabla 1-2. Diferencias entre tubo de Pitot y tubo de prandtl.
- Tabla 2-1. Datos de la calibración para el tubo annubar.
- Tabla 2-2. Ficha técnica del soplador de hojas.
- Tabla 2-3. Presupuesto del circuito integrado.
- Tabla 3-1. Ensayos de consumo de aire en los medidores de flujo.

ÍNDICE DE GRÁFICOS

- Gráfico 2-1. Curva polinómica de flujo másico de aire de admisión en función del voltaje de señal del MAF hilo caliente.
- Gráfico 3-1. Curvas de consumo de aire de hilo caliente y annubar en función de las rpm.

SIGLA

FDB	:	Freno Dinamométrico de Banco.
ECM	:	Unidad de control electrónico/ Electronic control module.
MACI	:	Motor a combustión interna.
PCM	:	Módulo de control del tren motriz /Powertrain control module.
ECU	:	Unidad de control del motor/Engine control unit.
MAF	:	Sensor de flujo de aire /mass air Flow.
IATS	:	Sensor de temperatura/intake air temperatura.
VAF	:	Sensor de tipo paletas/ vane air flow.
RAC	:	Relación aire- combustible.
LED	:	diodo emisor de luz/ light emitting diode

SIMBOLOGÍA

\dot{v}	:	Flujo volumétrico.
v	:	Velocidad.
A	:	Área de la sección de paso.
\dot{m}	:	Flujo másico.
m	:	Masa.
t	:	Tiempo.
d	:	Densidad.
v	:	Volumen.
%	:	Porcentaje.
HC	:	Hidrocarburos.
CO	:	Monóxido de Carbono.
Hz	:	Hertz.
[V]	:	Voltaje.
g	:	gramo.
s	:	segundos.
T°	:	temperatura
°C	:	Grado Celsius.
Z	:	número de cilindros.
RPM	:	Revoluciones por minuto.
Nm	:	Newton metro.
n	:	Numero de revoluciones por minuto
Pt	:	presión de impacto o total absoluta.
Ps	:	presión estática.
Rh	:	resistencia hilo caliente.
Ra	:	resistencia termistor.
R	:	resistencia.

Kpa : kilo pascal.
m³ : metros cúbicos.
min : minutos.
Kg: : kilogramos.
mm : milímetros.
W : watt.
\$: pesos.
A : amperes.
Kw : kilo watt.

INTRODUCCIÓN

Los medidores de flujo de aire son instrumento que nos permiten medir el flujo de aire en secciones de paso como puede ser el ducto de aspiración de aire de un motor a combustión interna, estos medidores serán de mucha ayuda al momento de realizar ensayos de rendimiento volumétrico, relación aire combustible y de consumo de aire.

En el presente trabajo de título se darán a conocer distintos tipos de medidores de flujo de aire, que pueden ser ocupados en el área automotriz como en el área industrial, se verá la física del aire necesaria para el entendimiento de la medición de aire en secciones de paso. En este trabajo se hace énfasis en dos medidores de flujo seleccionados los cuales serán un tubo annubar y un MAF tipo hilo caliente, luego se dará a conocer cómo hacer una correcta adquisición del equipo dependiendo de los requerimientos que este debe cumplir, para posteriormente hacer la instalación de estos. Posteriormente se harán los ensayos anteriormente mencionados en donde se realizará un análisis de los resultados en donde se verán las mediciones realizadas por estos equipos, estas mediciones serán mostradas en tablas y gráficos los cuales permitirán contrastar la información, los resultados de los medidores de flujo también podrán ayudar al diagnóstico del funcionamiento del motor, ya que se obtendrá un datos importantes que se pueden comparar o relacionar con otros como el consumo de combustible.

Junto con esto también se hará una guía de trabajo como ayuda pedagógica para que los alumnos puedan trabajar con estos equipos en el laboratorio del freno dinamométrico de banco.

OBJETIVO GENERAL:

Realizar mediciones de flujo de aire de admisión en un motor a combustión interna instalado en un freno dinamométrico, para la obtención de datos requeridos en posteriores ensayos

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Mostrar el estado del arte de los medidores de flujo de aire de admisión en un motor a combustión interna, para el entendimiento de su función y funcionamiento.
- Medir el flujo de aire de admisión mediante la selección e instalación de instrumentos que permitan realizar mediciones de aire de admisión en un motor a combustión interna instalado en un freno dinamométrico.
- Analizar resultados de los ensayos de medición de flujo aire de admisión en un motor a combustión interna, para concluir las diferencias entre sensores y el comportamiento del motor en las distintas mediciones realizadas.

**CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE DE LOS INSTRUMENTOS PARA MEDIR
FLUJO DE AIRE EN UN MOTOR ALTERNATIVO DE COMBUSTIÓN
INTERNA INSTALADO EN UN FRENO DINAMOMETRICO DE BANCO.**

1.1 FÍSICA DEL AIRE PARA REALIZAR MEDICIONES DE FLUJO DE AIRE DE ADMISIÓN, EN UN MOTOR A COMBUSTION INTERNA.

Para realizar mediciones del flujo de aire de admisión en un motor a combustión interna, se deben comprender conceptos de mecánica de fluidos como: flujo de aire volumétrico y másico.

Para calcular el flujo volumétrico, se debe conocer la velocidad del aire a medir y el área de la sección por la cuál va a pasar el flujo de aire.

$$\dot{v} = v \times A \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

donde:

$$\dot{v} = \text{Flujo volumetrico, } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right].$$

$$v = \text{Velocidad del aire, [m/s].}$$

$$A = \text{área de la sección, [m}^2\text{].}$$

Con la presente fórmula se consigue el flujo volumétrico del aire. Este dato obtenido es fundamental para acceder a la ecuación de flujo másico cuando no se cuenta con la masa de aire medida, o cuando no hay como medirla. Para acceder de forma más fácil a la ecuación, es necesario obtener la densidad del aire, ésta varía dependiendo de la altura, temperatura y también de otros factores, como la humedad. Para alcanzar un valor referencial es necesario conocer las características geográficas y atmosféricas, ya que la densidad del aire no será la misma a nivel del mar que en la cima de la cordillera.

Fórmula para calcular el flujo másico[6]:

$$\dot{m} = \text{Flujo masico, } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{g}} \right].$$

$$m = \text{Masa, [g].}$$

$$t = \text{Tiempo, [s].}$$

$$\dot{m} = m/t \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Si se desconoce la masa del aire (como se mencionaba anteriormente), se utilizará la densidad del aire, resultando:

$d = \text{Densidad}[\text{kg}/\text{m}^3]$.

$m = \text{Masa}[\text{g}]$.

$v = \text{Volumen}[\text{m}^3]$.

$$d = \frac{m}{v} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

Entonces la fórmula de flujo másico también puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\dot{m} = d \cdot \dot{v} \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

De esta manera, también se puede calcular el flujo másico de aire partiendo por el flujo volumétrico. El flujo másico es usado en los vehículos para que la ECU calcule la relación de aire y combustible, estos datos son entregados por el sensor de flujo de aire de admisión[6].

1.2 MEDIDORES DE FLUJO DE AIRE Y SUS TIPOS.

Los medidores de flujo de aire son instrumentos que permiten medir el caudal del aire o el flujo másico de éste, ya sea para determinar el caudal del viento en una zona exterior o para realizar mediciones de aire en una tubería o sección de paso.

Cabe destacar que la velocidad y el flujo, ya sea volumétrico o másico son dos conceptos distintos, ya que la velocidad es el resultado de la relación entre distancia y tiempo, por otra parte, el flujo es una relación entre volumen o masa y tiempo.

En el mercado se encuentran disponibles distintos tipos de medidores de flujo de aire, dependiendo de los requerimientos que implique la instalación, es así como existen: de uso industrial, para ventilación y climatización, de uso meteorológico y también se encuentran en los automóviles que realizan la medición de aire que entra por la admisión.

En el caso del uso industrial existen anemómetros en su diversidad de tipos:

1-. Hilo caliente: Mediante un filamento o alambre caliente varía su señal dependiendo de cuánto se enfríe el filamento con el flujo de aire que pasa alrededor de este.

2-. Rueda alada: Éste anemómetro usa una pequeña turbina que al girar emite una señal que se transforma en un valor de flujo.

3-. Cazoletas: Su estructura es similar al de un molino que gira cuando el flujo de aire golpea sus cazoletas, la mayoría funciona con un captor de vueltas basado en el efecto hall, con esta señal se obtiene la velocidad del viento, permitiendo calcular el flujo del aire.

4-. Tubo Pitot: Se compone de un tubo principal que se conecta perpendicularmente a otra tubería con forma de U, la cual contiene un fluido que al hacer ingreso el flujo de aire, este es empujado, haciendo una variación de la altura, obteniendo la velocidad del flujo de aire[6].

También de uso industrial hay medidores de caudal y de flujo másico de otros tipos como:

1-. Tubo Annubar: Es un tipo de tubo de Pitot. Este posee múltiples orificios para la toma de presión de estancamiento a lo largo de una sección transversal del tubo, todos estos orificios se unen en el interior del tubo annubar así, la presión obtenida será una presión promedio correspondiente a diversas velocidades.

Presión de estancamiento: Se refiere a la presión estática sumada a la presión dinámica, es decir, la presión total del tubo.

Presión estática: Es la que tiene un fluido, independiente de la velocidad de este.

Presión dinámica: Esta presión depende de la velocidad y densidad del fluido. Se puede decir que cuando los fluidos se mueven en un conducto, la inercia del movimiento. Provoca un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área.

2-. Flujómetros Coriolis: Este flujómetro consta es su interior con dos tubos en forma de U por los que pasa el flujo, estos tubos son sometidos a vibraciones, las que se verán alteradas dependiendo de la cantidad de fluido que circule por ellos.[6]

3-. Flujómetros de presión diferencial: Basan la medición mediante la diferencia de presiones, estos medidores restringen el paso del flujo en una parte de la tubería y calculan la diferencia entre la parte restringida y la que no está restringida, mediante esta diferencia obtienen como resultado un valor de flujo de aire.[6]

4-. Flujómetros electromagnéticos: Cuentan con bobinas que producen un campo electromagnético que con el paso del flujo generan una señal de voltaje.

Por último, de uso automotriz los sensores de flujo másico de aire “MAF” (Mass Air Flow) y sus distintos tipos:

- Hilo caliente: Los flujómetros de hilo caliente son utilizados para informar, a la unidad de control, la cantidad de aire admitida por el motor. Mide directamente la masa de aire. No requiere correcciones por variación de densidad debido a cambios de temperatura o de altitud
- Flujómetro de Karman vortex: Cuando un fluido pasa a través de un ducto, y es interrumpido por un cuerpo sólido este genera vórtices que tienen directa relación con el caudal que circula por el ducto, esto hace variar la frecuencia de los vórtices según la variación de caudal en el ducto, esta variación de frecuencia puede ser medida y con esta información se puede determinar la cantidad de flujo que circula por dicho ducto para saber más información sobre este sensor se explicará en el anexo 5 su estructura interna [3].
- VAF de tipo paletas: La función del VAF es medir el volumen del aire que está entrando a la cámara de combustión y enviar una señal a la computadora para que esta controle la cantidad de inyección, y en otras ocasiones el sensor tiene la función de controlar la bomba de combustible. Este flujómetro consiste en una paleta que se ubica al interior de un ducto transversalmente al flujo que se pretende medir. El flujo empuja la paleta que está unida a un eje, el movimiento de este eje tiene directa relación con el caudal, siendo posible medir el movimiento del eje el cual varía según la cantidad de caudal que circula por dicho ducto[3].

1.3 UTILIZACIÓN DE LOS MEDIDORES DE AIRE DE ADMISIÓN EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA

Los medidores de flujo de aire se utilizan para medir el aire que ingresa al motor a través del sistema de inducción de aire.

El aire es tan necesario para los motores de combustión interna como lo es el combustible. La forma en que se utiliza el aire en un motor puede hacer mucha diferencia en los costos de operación. Todos los motores de combustión interna utilizan una cantidad de aire específica para poder entregar el mayor rendimiento en distintos regímenes, esto es un valor que varía según cada motor y es determinado en el momento de su fabricación, al hacer uso del motor con una obstrucción del flujo del aire o con flujos mayores a los específicos puede ser riesgoso y producir daños, es así como el motor debe tener un volumen suficiente de aire para poder tener una combustión correcta.

El sensor MAF mide el flujo de aire que entra al múltiple de admisión. La información proporcionada por este sensor le ayuda al ECM a tomar decisiones como: calcular cuánto combustible se necesita para mantener la mezcla de aire/combustible en la correcta proporción, a esta mezcla se le denomina “mezcla estequiométrica”, que está en base a la composición química del combustible, para combustibles comerciales este valor se considera entre 14,7:1 a 15,1:1. A esta proporción se le denomina RAC (relación de aire y combustible) [7]

RAC estequiométrica: En condiciones normales, la combustión total de 1 gramo de gasolina se consigue con 14,7 a 15,1 gramos de aire, sin embargo, los motores a combustión interna no son capaces de crear las condiciones de homogeneidad entre aire y gasolina para quemarla al 100%, es decir, una parte quedará sin quemar o parcialmente quemada, con formación de CO (Monóxido de Carbono) y HC (Hidrocarburos). Hay que recordar que la combustión nunca es completa, independientemente de la relación aire/combustible, puesto que la reacción no se desarrolla en condiciones ideales. [7].

Lambda: Es la relación entre la RAC actual y la RAC estequiométrica.

Si lambda es menor a 1 se obtendrá una mezcla rica (menor cantidad de aire), si lambda es mayor a 1 una mezcla pobre (mayor cantidad de aire) y si lambda es igual a 1 se conoce como mezcla ideal. [5].

$$\lambda = \frac{RAC \text{ medida}}{RAC \text{ teorica}} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Una mal cuidado de los componentes del sistema de admisión de aire en un motor a combustión interna, con el paso del tiempo y de los kilómetros, puede provocar que este sensor se ensucie, por lo tanto, no transmitirá la información correcta, no efectuando adecuadamente su función. Los síntomas que se pueden apreciar en un motor con un sensor MAF defectuoso son las siguientes:

- Ahogamiento del motor por exceso de combustible.
- Pérdida de potencia.
- Altos niveles de CO.
- Humo negro por el escape.
- y respuesta tardía al acelerar.

Al encontrarse dicho sensor malo o sucio, el motor no trabajara en su estado óptimo ya que el sensor no va a leer de manera óptima la cantidad de masa de aire que está ingresando, por lo tanto no podrá enviarle la señal correcta de voltaje a la unidad de control del motor (ECU). Por su parte, la computadora usa esta señal para controlar la mezcla aire / combustible y el ajuste del encendido.

Para la admisión del aire en los motores a combustión interna existen dos alternativas: aspiración natural, y forzada o sobrealimentada.

Aspiración natural: Es un motor de combustión interna que aspira el aire del ambiente a presión atmosférica directamente por el filtro, hacia los cilindros, ésta aspiración es producida por el vacío que causa el pistón al momento de bajar en el tiempo de admisión.

Los sobrealimentados: Son aquellos motores a combustión interna que fuerzan la entrada de aire adicional mediante sobrealimentadores como turbocompresores centrífugos o volumétricos.

Un motor sobrealimentado no puede equipar un sensor MAF que equie un motor de aspiración natural que cuente con las mismas características (como ejemplo se puede demostrar al equipar un turbo cargador centrifugo a un motor de aspiración natural) un motor al estar sobrealimentado hace mayor ingreso de caudal de aire a la cámara de combustión, ya que este busca aumentar el rendimiento volumétrico, por ello, el rango

del sensor no podría medir caudales que sobrepasen su rango de medición o podría tener un mal funcionamiento en cierto régimen del motor (ralentí, distintos porcentajes de aceleración, cargas bajas, cargas parciales o plenas cargas). Debido a esto es necesario aclarar los requisitos del motor y en los rangos que éste trabaja, para así elegir el sensor correcto, obteniendo un funcionamiento satisfactorio, es decir, un mayor rendimiento del motor. [7]

1.4 COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR MAF

La ubicación de este sensor se encuentra después del filtro de aire y antes, o a la entrada del cuerpo de aceleración. Para el uso automotriz contamos con distintos tipos de sensores MAF, todos cumplen la misma función, la cual es informar a la ECU (Electronic control unit/unidad de control electrónica) la cantidad de aire entrante en el motor.

La lectura del sensor MAF de tipo hilo caliente en el scanner la mostrará en Hertz (Hz), Gramo/segundo (g/s), y Voltaje [V].

1.4.1 MAF de tipo hilo caliente:

1-. Componentes:

1.1-. Termistor: Mide la temperatura del aire que ingresa al motor.

1.2-. Cable de platino: Es mantenido a una temperatura constante con relación a la temperatura del termistor, ese mantenimiento de temperatura es realizado por el circuito de control electrónico.

1.3-. Circuito de control: El sensor MAF de tipo hilo caliente, recibe una alimentación de: 12[V] que se pueden sacar de la batería y además envía una señal de: 1[V] a 5[V] a la ECU, dependiendo de cuánto aire vaya ingresando, finalmente éste circuito se cierra con un pin que va a masa.

2-. Funcionamiento: consta de un Venturi con dos hilos de platino un hilo caliente y otro de compensación que mide la temperatura del aire admitido.

El Venturi está suspendido dentro del conducto principal del sensor. Un circuito electrónico incorporado al sensor mantiene el hilo caliente a una temperatura constante de 100°C por arriba de la temperatura del aire admitido.

El aire que atraviesa este sensor provoca el enfriamiento del hilo caliente. Lo cual el circuito electrónico compensa esta disminución de T° , aumentando la corriente que circula por el hilo caliente con el objetivo de mantener la diferencia de 100°C

La variación de corriente del hilo caliente, para mantener su temperatura siempre en un valor constante por arriba de la del aire, es una medida de la masa del aire admitida.

Como partículas depositadas a alta temperatura sobre el hilo caliente pueden alterar la calibración del sensor, el hilo caliente recibe un calentamiento extra al momento de detener el motor ya que el computador envía una corriente eléctrica que hace que el sensor se caliente casi al rojo vivo, quemando las partículas que se hallan pegado a él, quedando nuevamente limpio.

El circuito de control regula la corriente con precisión en relación con el valor de resistencia variable (valor de Resistencia de alambre caliente) de manera que se genera una señal. El flujómetro de aire transmite un valor de voltaje a la unidad de control donde a la salida se convierte en una señal de aire de admisión. Dicho sensor se caracteriza por realizar un auto limpieza, ya que con su temperatura elimina impurezas que se encuentran en el filamento caliente. [7].

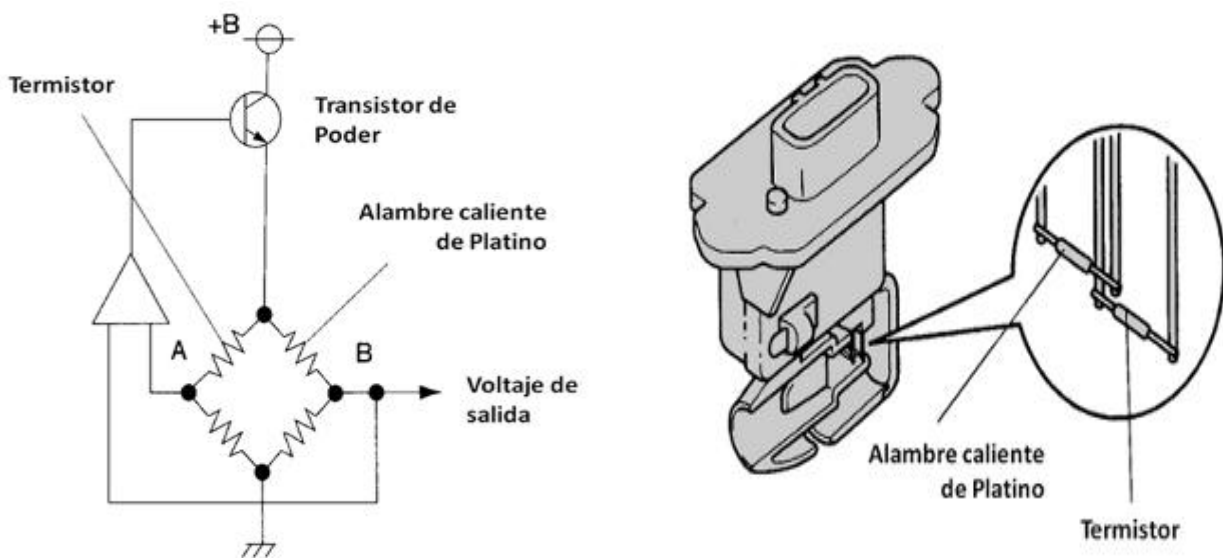


Figura 1-1. Esquema de los componentes del sensor MAF tipo hilo caliente. Fuente, [1]

En la figura 1-1. Se puede apreciar el sensor MAF tipo hilo caliente, con la disposición de cada uno de sus elementos internos, para una mejor comprensión de su funcionamiento.

1.4.2 MAF Karman vortex:

1-. Componentes:

1.1-. Generador de vórtices: Es un elemento sólido que interrumpe el flujo del aire, su estructura, y geometría, haciendo que se generen pequeños vórtices cuando éste cuerpo corta el paso del flujo de aire.

1.2-. Orificio de dirección: Con el paso de los vórtices hace oscilar el espejo o reflector metálico.

1.3-. Espejo o reflector metálico: Encargado de reflejar la luz del LED que circula por los vórtices hacia el fototransistor.

1.4-. LED: Emite una luz que pasará a través de los vórtices para comunicarse con el fototransistor, generando una señal con la frecuencia de los vórtices. Dicha señal se inicia con la interrupción de la luz producida por el movimiento del reflector metálico.

1.5-. Fototransistor: Éste al recibir la señal de luz alimenta su base, dejando el paso a la señal de voltaje desde el colector al emisor. Esta señal llega a la ECU de forma intermitente.

2-. Funcionamiento: Cuando el aire pasa a través del medidor de flujo, el generador de vórtice crea un remolino de aire que se mueve en dirección al cuerpo de aceleración. Este efecto de remolino se conoce como "vórtice de Karman". La frecuencia varía con la velocidad del aire que ingresa al medidor de flujo.

El reflector de metal se utiliza para reflejar la luz del LED al fototransistor. El reflector se coloca directamente encima de un orificio de dirección que hace que oscile con los cambios en la frecuencia del vórtice. Cuando el espejo oscila, la referencia de 5 [V] se conecta a tierra mediante un fototransistor dentro del sensor. La señal digital resultante es una onda cuadrada de 5 [V] que aumenta en frecuencia en proporción a los aumentos en el flujo de aire de admisión.

En la figura 1-2 se muestran los componentes que son: el sensor MAF Karman Vortex con sus componentes internos, foto diodo (1), fototransistor(2) y un diodo Zener(3) y su conexión con la PCM.

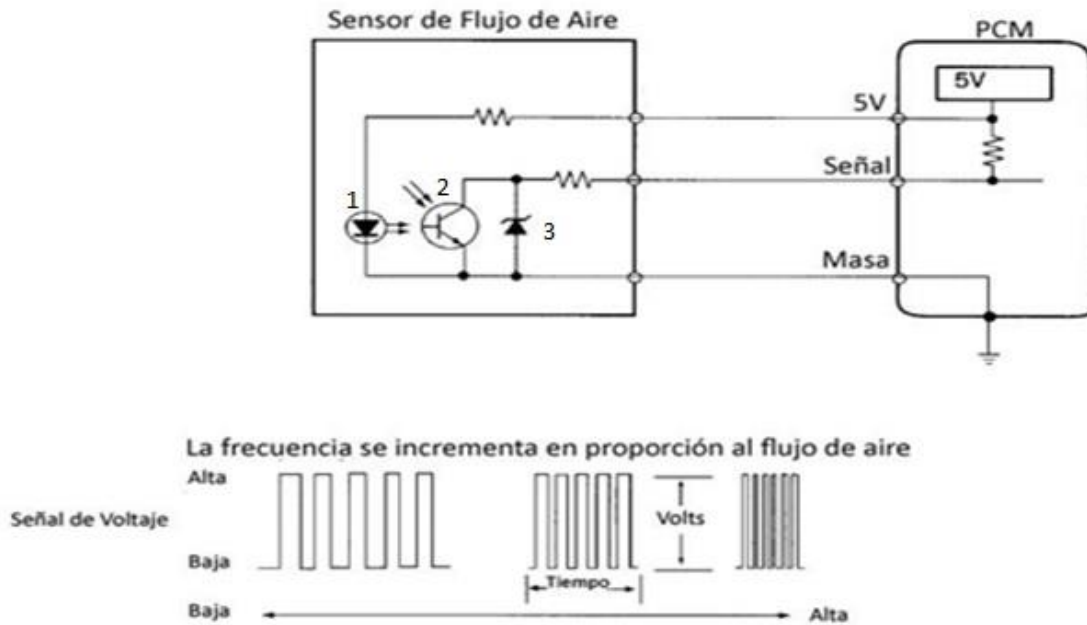


Figura 1-2. Esquema electrónico y señal del MAF Karman Vortex. Fuente, [3]

La señal generada es una señal cuadrada con una amplitud de 5 [V] o en ciertos casos los que determine el fabricante, que incrementará su frecuencia de repetición en proporción al aumento del flujo de aire, esta señal es de frecuencia variable por lo cual al visualizar la señal en un scanner esta aparecerá con la unidad de Hertz, o también se puede verificar la señal utilizando un osciloscopio automotriz [3].

También éste tipo de sensor trae incorporado un sensor de temperatura que mide el aire de ingreso (IATS: intake air temperature sensor).

IAT: Es un sensor tipo termistor que informa la temperatura del aire de entrada a la ECU para que pueda corregir parámetros en base a la temperatura del aire.

1.4.3 MAF tipo paletas sensor:

1-. Componentes:

1.1 -. Plato medidor: Se desliza en proporción al volumen de aire, fluyendo hacia la cámara de admisión, por ende, se flexiona mediante el flujo aire que circula por el plato.

- 1.2 -. Plato compensador: Plato que se localiza dentro de la cámara de amortiguación, cumpliendo la función actual que tiene un amortiguador (prevenir movimientos rápidos o, vibraciones del plato medidor).
- 1.3 Resorte de retorno: El flujo de aire que va hacia la cámara de admisión es el que actúa directamente contra éste resorte, ya que el flujo entrante lo va a comprimir al igual que el plato medidor, en otras palabras, lo flexiona según el volumen que circule por el plato.
- 1.4 Potenciómetro o resistencia variable: El movimiento del deslizador contra la resistencia del potenciómetro ocasiona que una señal de voltaje variable se transmita hacia al Módulo de control del tren motriz (PCM).
- 1.5 Cámara de amortiguación: Éste componente ayuda a reducir los movimientos rápidos del plato medidor.
- 1.6 Tornillo de ajuste de ralentí (regulado de fábrica): Viene calibrado de fábrica, por lo que está cubierto con una tapa resistente. No se recomienda que se remueva la tapa para reajustar el tornillo porque el sensor se puede dañar de forma irreversible.

2-. Funcionamiento: Durante la operación del motor, el flujo de aire en la cámara de admisión reacciona contra el plato medidor, el resorte de retorno lo flexiona contra el plato en proporción al volumen de aire que entra por él. Un plato compresor (el cuál es adherido al plato medidor) se encuentra dentro de la cámara de amortiguación, actuando como un “amortiguador”, es decir, previniendo movimientos rápidos o las vibraciones que pueda tener el plato medidor [3].

El movimiento del plato medidor se transfiere a través de un eje, hacia un deslizador sobre el potenciómetro. El desplazamiento que tiene el deslizador, contra la resistencia del potenciómetro, ocasiona que una señal de voltaje variable se transmita hacia la PCM, debido a la relación que existe entre el plato medidor y el potenciómetro.

También se puede agregar, que los cambios de señal hacia la PCM pueden ser proporcionales al volumen de aire que está ingresando a la admisión, por lo que puede mover el plato medidor.

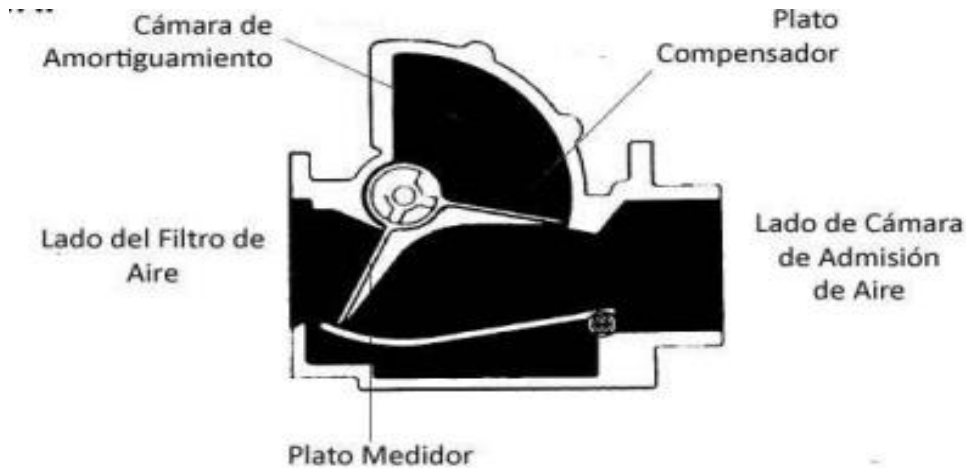


Figura 1-3. Esquema composición de MAF tipo paletas. Fuente, [3]

En la figura 1-3 se puede apreciar las partes que posee el sensor tipo paletas, para una mejor comprensión de su funcionamiento, Este sensor contiene incorporado una IAT el cuál es un sensor de temperatura del aire de ingreso [3].

1.4.4 Medidores de flujo de aire y sus características.

Tabla 1-1 distintos tipos de medidores de flujo de aire. Fuente [12]

Tipo	Rangeabilidad	Exactitud(%)	Escala	Presión max. (bar)	Temperatura max, °C	Perdida de carga	Servicio	Materiales	Costo relativo	ventajas	desventajas
Placa	3:1	2% - 4%	cuadrática	400	500	Media	Líquido/Vapor/gas	Metales/plásticos	Bajo	Simple, económica	Posible obturación, desgaste
Tobera	3:1	2%	cuadrática	400	500	Media	Líquido/Vapor/gas	Metales/plásticos	Alto	Simple, exactitud	Posible obturación, coste alto
Tubo Venturi	3:1	1%	cuadrática	400	500	Baja	Líquido/Vapor/Gas	Metales/plásticos	Alto	Exactitud, Poca Δp	Posible obturación, coste muy alto
Tubo Pitot	3:1	1% - 3%	cuadrática	400	500	Muy baja	Líquido/Vapor/gas	Metales/plásticos	Bajo	Simple, Económico	Posible obturación
Tubo annubar	3:1	0.5%-1.5%	cuadrática	400	500	Muy baja	Líquido/Vapor/gas	Metales/plásticos	Bajo	Mayor exactitud, Poca Δp	Posible obturación
Rotámetro	10:1	1% -2%	lineal	400	250	Media	Líquidos	Metales/Plásticos/Vidrio	Bajo	Simple, Económico, Mayor Exactitud	Posible obturación

Vertedero	10:1	1% -2%	especial	ATM	60	Baja a media	Líquidos/gas	Metales	Alto	Simple, bajo costo	Posible obturación
Turbina	20:1	0.25%	Lineal	200	250	Alta	Líquido/gas	Metales	Alto	Exactitud, Margen amplio	Desgaste, daños por caudal excesivo
Ultrasónico	20:1	2%	Lineal	100	250	Ninguna	Líquidos/Gas	Metales/Plásticos	Alto	Cualquier líquido, bajo Δp , bajo mantenimiento	Coste inicial alto, sensible a variaciones densidad
Placa de impacto	10:1	1%	Cuadrática	100	400	Media	Líquidos	Metales	Medio	Fluidos viscosos	Poca capacidad
Magnético	40:1	0.5% - 1%	Lineal	20 - 200	150	Ninguna	Líquidos	Metales/Teflón/Fibra de vidrio	Alto	Exactitud, baja Δp	Líquidos conductores, electrodos pueden recubrirse
Disco basculante	10:1	1% -5%	Lineal	100	80	Alta	Líquidos/Gas	Metales/Plásticos	Bajo	Económico	Desgaste ,líquidos limpios, limitado uso en grandes tuberías
Piston oscilante	10:1	0.50%	Lineal	10 - 150	120	Alta	Líquidos/Gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio, económico	Desgaste ,líquidos limpios, limitado uso en grandes tuberías
Piston alternativo	10:1	0.50%	Lineal	25	100	Alta	Líquidos/Gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio	Desgaste ,líquidos limpios, limitado uso en grandes tuberías
Cicloidal	10:1	0.50%	Lineal	100	150	Alta	Líquidos/Gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio , baja Δp	Desgaste ,líquidos limpios, limitado uso en grandes tuberías
Birrotor	10:1	0.50%	Lineal	100	200	Alta	Líquidos/Gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio, reversible	Desgaste, líquidos limpios, limitado uso en grandes tuberías
Oval	10:1	0.50%	Lineal	100	180	Alta	Líquidos/Gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio, reversible	Desgaste ,líquidos limpios, limitado uso en grandes tuberías
Torbellino	10:1	1%	Lineal	50	100	Media	Líquidos/Gas	Metales/Plásticos	Alto	Margen amplio, poca Δp , fácil instalación	Caro, vibración afecta exactitud
Vortex	10:1	1%	Lineal	50	100	Media	Líquidos/Gas/vapor	Metales/Plásticos	Alto	Margen amplio, fácil instalación	Caro, vibración afecta exactitud
Térmico	10:1	1%	Lineal	100	65	Ninguna	Gas	Metales/Plásticos	Alto	Económico, fluidos de baja densidad	Poca exactitud, limpieza periódica
Hilo caliente	10:1	+1%	especial	100	65	Baja	Gas	Metales/Plásticos	Medio	Medida Caudales Gases turbulentos	Investigación, Usos industriales limpios
Coriolis	10:1	0.50%	Lineal	900	-250°C a 400°C	Baja	Líquido/Vapor/gas	Metales/Plásticos	Alto	Exactitud Elevada, Caudal masa Verdadero	Sensible a vibraciones, coste alto

En la tabla 1-1 se investigó algunos de los sensores de flujo de aire que circulan en el mercado ya que la gama de medidores de flujo de aire es muy extensa, por ende se procedió a investigar sobre su Rangeabilidad, exactitud, escala, precisión, temperatura a

la cual operan, pérdida de carga, servicio , materiales, ventajas , desventajas y finalmente su costo, para así tener una idea clara de los medidores de flujo de aire y sus tipos [12].

1.5 COMPOSICION Y FUNCIONAMIENTO DEL TUBO PITOT Y ANNUBAR

1.5.1 Tubo de Pitot

- Origen:

lo invento el ingeniero francés Henri Pitot 1732 luego lo modifiko Henry Darcy en 1858 se utiliza mucho para medir la velocidad del viento y para cuantificar las velocidades del aire y gases en aplicaciones industriales

El tubo de Pitot es un instrumento que permite medir el flujo, es uno de los medidores más exactos para medir la velocidad de un fluido dentro de una tubería, su instalación consiste en un simple proceso de ponerlo en un pequeño agujero en una tubería, el tubo Pitot tiene una sección circular y generalmente doblado en L. Éste se encuentra compuesto por dos tubos de pequeño diámetro con una abertura delantera que se dispone contra una corriente o flujo, de forma que su eje del centro se encuentre paralelo con respecto a la dirección del flujo de la corriente, el cual choca en forma frontal en el orificio.

Los tubos pueden montarse por separado o agrupados dentro de un alojamiento, formando un dispositivo único. Uno de los tubos mide la presión de impacto en un punto. El otro mide únicamente la presión estática. Un tubo Pitot mide dos presiones simultáneamente, la presión de impacto y la presión estática.

- Funcionamiento:

Si es necesario medir la velocidad de un fluido, se introduce este instrumento en la dirección opuesta del fluido y por la presión de dicha corriente, el fluido se empezará a elevar hasta una cierta altura sobre la superficie, conociendo esta altura ya se puede saber la velocidad de la corriente esta puede ser mostrada con algún indicador de velocidad(flujómetro).

- Para que se utiliza el tubo de Pitot

El tubo de Pitot se utiliza para calcular la presión total, también denominada presión de estancamiento (suma de la presión estática y presión dinámica)

- Características

El tubo de pitot es un medidor de flujo. Son instrumentos sencillos, económicos y disponibles en un amplio margen de tamaños

Es uno de los medidores más exactos para medir la velocidad de un fluido dentro de una tubería.

El tubo Pitot tiene sección circular y generalmente doblado en L en la siguiente figura se muestra un esquema del tubo Pitot [8].

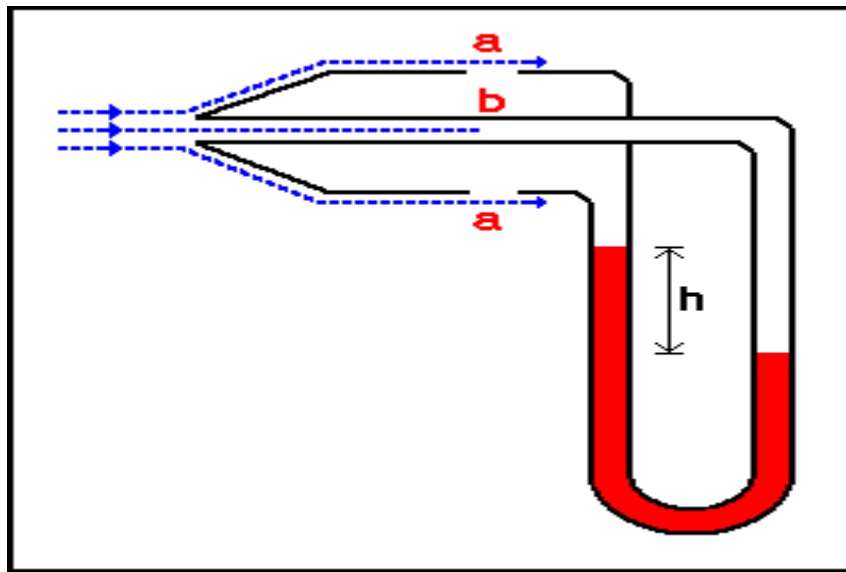


Figura 1-4. Esquema de tubo Pitot. Fuente, [8]

La figura 1-4. consiste en un tubo con una abertura delantera, que se dispone contra el flujo de forma que su eje central se encuentre paralelo con respecto a la dirección de la corriente para que la corriente choque de forma frontal en el orificio del tubo.

La presión medida(diferencial) a través del tubo Pitot puede calcularse utilizando la ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli nos muestra:

$$p_t = p_s + \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2}\right) \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

Al realizar el cálculo de esta presión resulta ser proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido

$$v = \frac{\sqrt{2(pt-ps)}}{d} \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

En la que

Pt: presión de impacto o total absoluta en el punto donde el aire anula su velocidad

Ps: presión estática absoluta en el fluido

d: densidad

v : velocidad del fluido en el eje del impacto

Presión de impacto o total absoluta: esta presión se denomina también presión de estancamiento, es la suma algebraica de la presión estática total y la presión de la velocidad, en cualquier punto particular de un fluido.

Presión estática: es la presión medida en la pared del tubo que conduce un fluido como el agua o el aire.

Con la diferencia de la presión estática y la presión total (de impacto) se genera la presión dinámica.

Presión dinámica: es la presión medida contra el flujo del fluido. Depende de la densidad y de la velocidad

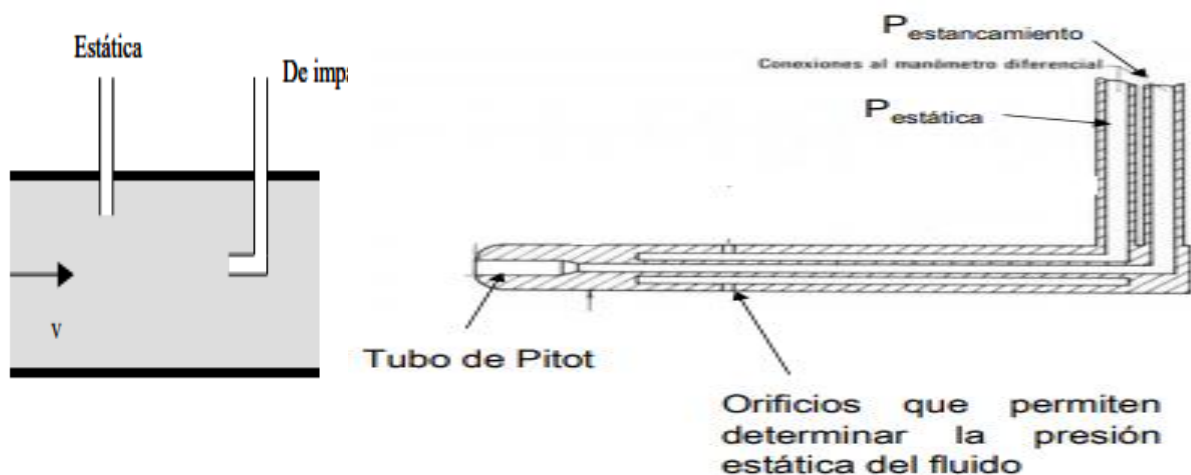


Figura 1-5. Diagrama del tubo pitot y su funcionamiento interno. Fuente, [8]

Figura 1-5. En un ducto mientras el flujo sea perpendicular lo que se va a estar midiendo va a ser la presión estática, pero al conectar un Pitot lo que se va a medir va a ser una presión total si se conectase en forma diferencial un instrumento el cual midiese por una parte la presión estática y midiese por otra parte la presión total se estaría midiendo lo que se conoce como presión dinámica.

Al conocer la presión dinámica con un manómetro se puede calcular la velocidad, conociendo la sección de paso se puede calcular teniendo el caudal y la densidad del aire se puede calcular el flujo másico del aire.

Al juntar dos medidores un pitot y un medidor de presión estática por el centro medirá presión total(pitot) y por los orificios medirá presión estática por lo que entregará presión diferencial por lo que debería llamarse tubo de prandtl [8].

En la práctica se le suele llamar a este instrumento tubo de Pitot, siendo el nombre de tubo de Prandtl menos conocido.

El tubo de Prandtl: La idea de Ludwig Prandtl fue la de combinar en un solo instrumento un tubo de Pitot y un tubo piezométrico: El tubo de Pitot mide la presión total; el tubo piezométrico la presión estática, y el tubo de Prandtl mide la diferencia de las dos, que es la presión dinámica.

Tabla 1-2 Diferencias entre tubo de Pitot y tubo de prandtl. Fuente, elaboración propia en Microsoft Word

Tubo de Prandtl	Tubo de Pitot
Utilizado para medir velocidad de un fluido	Utilizado para medir presión de estancamiento
Es la combinación de dos instrumentos	Solo es un instrumento

1.5.2 El tubo annubar

Este tubo annubar también es un tipo de tubo de Pitot, pero el cual es más exacto. Se caracteriza por tener una baja pérdida de carga, empleándose en la medición caudales líquidos y gaseosos.

El tubo annubar consta de dos tubos, el de presión total y el de presión estática. Con la diferencia de estas presiones se logra obtener la velocidad del fluido y conociendo la sección, se obtiene el caudal.

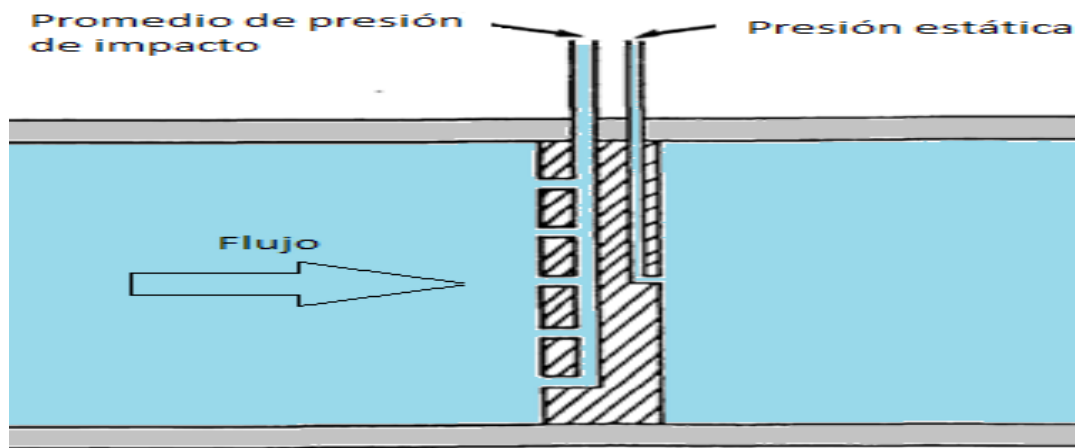


Figura 1-6. Diagrama del tubo annubar y sus presiones. Fuente, [9]

La figura 1-6 Estos tubos se encuentran situados de diferentes formas, por ejemplo, el tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería el que consta de varios orificios de posición crítica (los orificios tienen áreas iguales) que se utilizan para interpolar los perfiles de velocidad y realizar un promedio[5]

El flujo volumétrico es calculado a partir de dicha diferencia usando el principio de Bernoulli y tomando en cuenta el diámetro interno del ducto.

La principal diferencia entre el tubo annubar y el tubo de Pitot, es que el tubo annubar toma múltiples muestras a lo largo de una sección de tubería y de esta manera promedia las presiones diferenciales encontradas y así toma en cuenta las variaciones en caudal a lo largo de la sección. Un tubo Pitot aporta una lectura similar si la punta se ubica en un punto dentro de la sección transversal del ducto en donde la velocidad del flujo es cercana a la velocidad promedio.

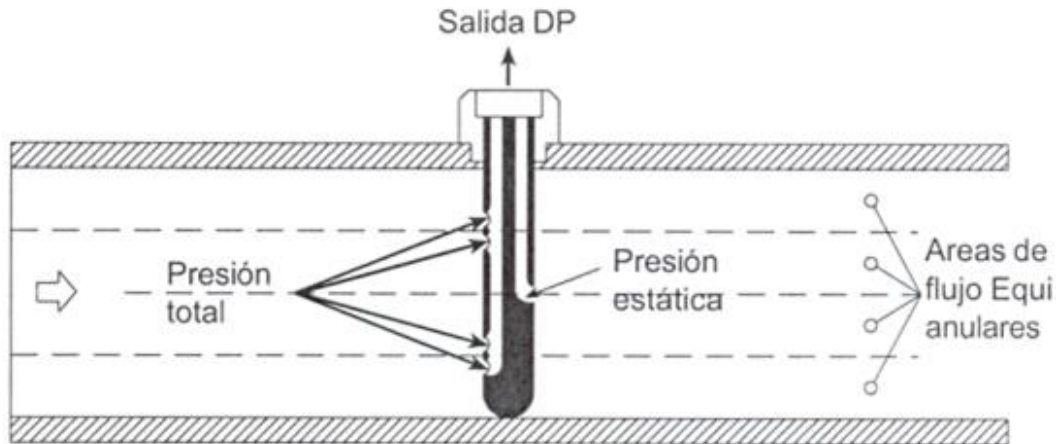


Figura 1-7. Composición del tubo annubar. Fuente, [9]

En la figura 1-7 se puede apreciar que un tubo annubar se desarrolló con numerosos agujeros para obtener un valor representativo de la velocidad media. La separación entre agujeros va a depender del número de estos cada uno cobra una zona anular de flujo equivalente

La presión estática es medida por el tubo que se encuentra ubicado detrás del tubo de presión total, éste contiene un solo orificio el cuál presenta una presión transversal que puede ser circular o elíptica. A su vez, cada una de éstas presenta un coeficiente distinto, en contraste al tubo encargado de medir la presión total [7].

De los dos tubos que están en el interior, uno sirve para promediar las presiones obtenidas en los orificios, midiendo la presión total, mientras que el otro tubo que se encuentra en la parte posterior mide la presión estática en el orificio central .

Para la instalación de un medidor de flujo de aire de admisión en un motor a combustión interna instalado en un freno dinamométrico de banco se seleccionó el Annubar, ya que se contaba con su disposición en el taller de mecánica automotriz, también se puede agregar que no es un instrumento muy usado para medir flujo de aire en un motor a combustión interna principalmente por su tamaño y porque utiliza más elementos que un sensor MAF tipo hilo caliente para comunicarse con la ECU.

CAPITULO 2: INSTALACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE AIRE DE ADMISIÓN EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA INSTALADO EN UN FRENO DINAMOMÉTRICO.

2.1 REQUERIMIENTOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SENSORES DE FLUJO MÁSICO DE AIRE PARA LA INSTALACIÓN EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA.

La tecnología automotriz está utilizando actualmente una gran cantidad de componentes electrónicos como una gran variedad de sensores y unidades de control los cuáles pueden asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas del vehículo. Los sensores proporcionan datos útiles y necesarios para el funcionamiento óptimo del motor y la operación correcta del vehículo. En un automóvil puede haber una gran cantidad de sensores, ellos se verán deteriorados con el tiempo al no realizar el mantenimiento correspondiente, como, por ejemplo: limpieza o verificación de contactos.

Por otra parte, los vehículos deben cumplir con una norma de emisiones contaminantes y que al operarlos el motor presente la mayor eficiencia posible. Esto requiere que la mezcla aire-combustible sea precisamente definida utilizando un sensor de flujo de masa de aire (MAF), el que permite registrar la cantidad exacta de aire para transmitirla posteriormente, por medio de una señal eléctrica a la ECU [1].

Para la instalación de un sensor MAF se requieren conocer los siguientes puntos para comprobar si es apropiado para el motor:

- Volumen unitario.
- Carrera del pistón
- Rendimiento volumétrico.
- Número de cilindros.
- RPM.
- Si corresponde a un motor 4 tiempos o 2 tiempos.

Para saber si el sensor trabaja correctamente, se deben calcular con éstos mismos datos el consumo de aire teórico y compararlo con el real, debiendo obtener una similitud considerable.

Con todos los datos nombrados anteriormente, se puede verificar si el sensor es apto en el motor o si sólo realiza mediciones correctas en ralentí, o para cierto porcentaje de apertura de la mariposa. Además, al analizar los sensores se debe constatar si: viene sobre dimensionado, es decir, si puede medir más aire de lo que consume el motor y/o funciona

con el voltaje adecuado (5 [V] de señal y referencia) esto puede depender del fabricante eventualmente.

El funcionamiento del sensor MAF tipo hilo caliente corresponde a una corriente eléctrica que fluye hacia el hilo caliente, esto provoca que el hilo caliente eleve su temperatura. Cuando el aire pasa alrededor del hilo caliente, este baja su temperatura en función de la masa de aire entrante. Al controlar la temperatura del hilo caliente para que sea constante mediante la corriente eléctrica, dicha corriente será proporcional a la masa de aire de entrada, siendo esta una magnitud medible.

En caso de los MAF tipo hilo caliente, la corriente se convierte en un voltaje que a continuación se le envía a la ECU desde el terminal VG.

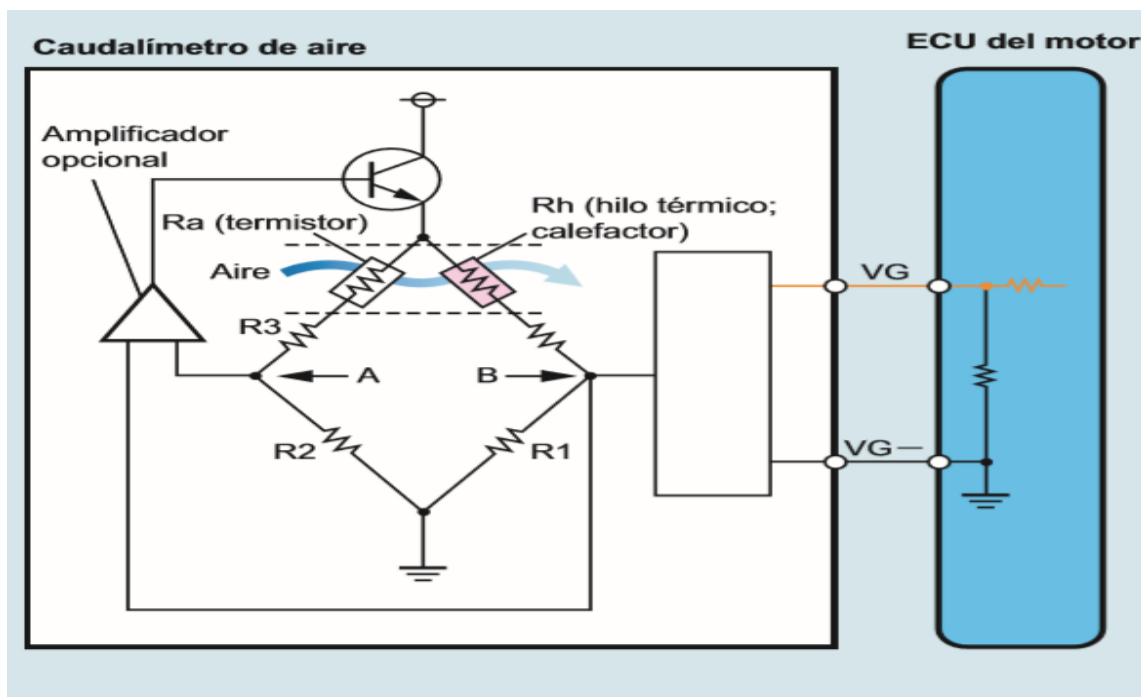


Figura 2-1. Circuito interno del sensor MAF tipo hilo caliente. Fuente, [10].

En la Figura 2-1 se muestra la composición de las partes internas de un sensor MAF tipo hilo caliente, en donde se puede ver que la disposición de los elementos forma una conexión de tipo puente de Wheatstone, Este circuito se utiliza para lograr medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de las líneas o brazos que conectan las resistencias, en este caso la resistencia desconocida a medir es el hilo caliente de dicho sensor MAF.

2.1.1 Circuito interior del MAF tipo hilo caliente:

Como se muestra en la imagen 2.1, se incorpora un hilo caliente en un circuito de puente de Wheatstone, este circuito tiene como característica que no hay diferencia de potencia en el punto A y B, cuando el producto de la resistencia en líneas diagonales es igual, esto quiere decir que al cumplirse $[R_a + R_3]R_1 = R_h R_2$ el voltaje entre el punto A y B es igual a cero.

Cuando el flujo del aire pasa por el hilo caliente (R_h) y lo enfría, disminuye su resistencia, lo que causa una diferencia de potenciales entre el punto A y B. un amplificador operativo detecta esta diferencia y hace una subida de voltaje (aumentando la corriente que se envía al hilo caliente (R_h)) cuando esto ocurre la temperatura del hilo caliente vuelve a subir lo que incrementa su resistencia hasta igualar nuevamente los potenciales en el punto A y B (los voltajes de los puntos A y B aumentan).

Con este circuito de puente de Wheatstone el sensor MAF tipo hilo caliente puede medir la masa de aire entrante detectando el voltaje en el punto B.

La temperatura del hilo caliente (R_h) se mantiene siempre constante y por sobre la temperatura del aire de entrada utilizando el termistor (R_a). Así la medición de la masa de aire entrante será precisa incluso si hay variaciones de temperatura del aire de entrada, no será necesario que la ECU modifique la duración de la inyección de combustible para la temperatura del aire de entrada.

Además, cuando la densidad del aire disminuye debido a la altura, también disminuye la capacidad de refrigeración del aire en comparación con el mismo volumen de aire a nivel del mar. Por lo tanto, se reduce la cantidad de refrigeración para el hilo caliente. Dado que la masa de aire también disminuye, la corrección de compensación de altitud no es necesaria [10].

2.2 SELECCIÓN, ADQUISICIÓN E INSTALACIÓN DE UN SENSOR MAF DE TIPO HILO CALIENTE Y UN TUBO ANNUBAR EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA

Para seleccionar un sensor MAF de tipo hilo caliente de forma correcta se debe consultar el título anterior de este trabajo (título 2.1), que ayuda a conocer los requerimientos con los que se deben cumplir antes de instalar un sensor MAF de tipo hilo caliente, de lo contrario, no se podrá hacer una instalación satisfactoria, o las mediciones resultarán erróneas. Junto a lo anterior, se debe tener en cuenta el espacio del que se dispone, por lo tanto, ciertos sensores no servirán, como por ejemplo: La instalación de un tubo annubar en un motor a combustión interna montado en un vehículo, resultara más difícil que hacer la instalación de un sensor MAF de tipo hilo caliente diseñado para uso automotriz. Cabe resaltar que cuando se colocan medidores de flujo de aire de admisión en un motor a combustión interna, instalado en un freno dinamométrico de banco, se disponen de las características del motor mencionadas anteriormente (punto 2.1). Debido a que se cuenta con un espacio adecuado junto a un sistema de adquisición de datos instalado previamente en el freno dinamométrico de banco, se ha decidido seleccionar dos medidores de flujo de aire, siendo un tubo annubar y un sensor MAF tipo hilo caliente.

Los dispositivos que van a ser instalados en el motor a combustión interna son un annubar y un sensor MAF de tipo hilo caliente. A continuación, se detallan las formas de instalación de cada uno, ya que la posición en la que se ubican en el motor no sera la misma, no contando con las mismas conexiones.

2.2.1 Instalación del tubo annubar.

El annubar cuenta con una conexión simple que consta en conectar el adaptador al tubo annubar, dejándolo fijo con los pernos y tuercas de sujeción. Se utilizará silicona, o un sellador semejante entre el annubar y el adaptador previo a apernarlo, para así evitar que ingrese aire a la unión como se puede apreciar en la figura 2-2.



Figura 2-2. Adaptación de acople reductor. Fuente, fotografía tomada en el Laboratorio de Máquinas.

Luego se conectará el tubo annubar al transductor de presión mediante un tecalan de 4[mm]. El transductor de presión entregará los datos obtenidos al sistema de adquisición de datos, con esto se podrá visualizar la cantidad de aire de admisión que ingresa al motor en la figura 2-3 se puede visualizar la los orificios donde ira el tecalan hacia el transductor de presión.



Figura 2-3. Ubicación de conexión del tecalan. Fuente, fotografía tomada en el Laboratorio de Máquinas.

Al instalar las piezas al tubo de entrada, del porta filtro, se debe sellar con una junta de goma. Es de suma importancia verificar que todo esté bien sellado ya que el annubar estará entregando una mala lectura, obteniéndose datos erróneos.

en la figura 2-4 se aprecia el annubar ya instalado en su posición correspondiente para efectuar lecturas con el programa SMAC del FDB.



Figura 2-4. instalación del tubo annubar en el porta filtro. Fuente, fotografía tomada en el Laboratorio de Máquinas.

2.2.2 Instalación del sensor MAF tipo hilo caliente.

Previo a la selección del sensor más adecuado es necesario verificar si el sensor funciona de forma correcta, la manera de probar este sensor es obteniendo los datos correspondientes mediante la conexión del escáner, y un voltímetro conectado en la salida de señal del sensor. Con la ayuda de un soplador de hojas apuntando directamente al sensor se obtendrán distintos valores de voltaje y flujo másico, dependiendo de la variación de flujo del soplador de hojas.

Con los datos captados se pudo obtener como resultado el siguiente gráfico, éste muestra una curva polinómica grado 3 correspondiente a la señal del sensor:

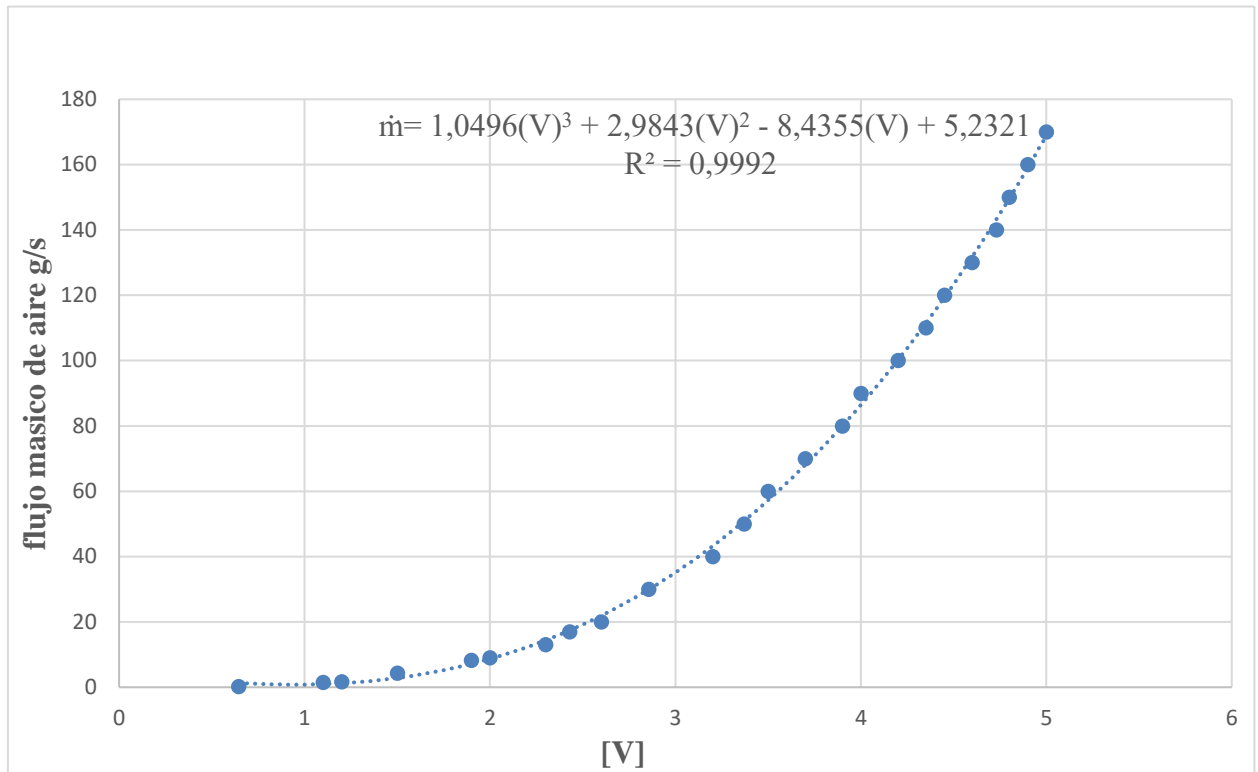


Gráfico 2-1. Curva polinómica de flujo másico de aire de admisión en función del voltaje de señal del MAF hilo caliente. Fuente, elaboración propia en Microsoft Excel.

Mediante la fórmula obtenida en la gráfica 2-1 se puede calcular el valor del flujo másico de aire para cada valor de voltaje, es decir, midiendo un voltaje dado como señal por el sensor se conocerá qué cantidad de masa de aire está aspirando el motor a combustión interna.

La instalación de un sensor MAF de tipo hilo caliente adicional al motor, requerirá adaptar un tubo, en el cual se debe montar el sensor, para luego encajar entre el filtro de aire y el tubo de inducción de aire en el motor. El material adecuado para hacer el tubo es el plástico por las siguientes características: su bajo coeficiente de roce, lo que permite adaptarlo de forma más fácil, como su bajo precio, lo cual facilita su adquisición.

Para instalar el sensor de flujo en el tubo se debe hacer un orificio a este, correspondiente al diámetro de la base del sensor. Una vez puesto el sensor este se debe sellar con silicona o algún material similar, para sellar y evitar la aspiración de aire por espacios con falta de hermeticidad como se aprecia en la figura 2-5.



Figura 2-5. instalación del sensor MAF tipo hilo caliente en el tubo adaptador. Fuente, fotografía tomada en el Laboratorio de Máquinas.

El tubo con el sensor MAF tipo hilo caliente sólo deber ser acoplado entre el filtro de aire y la inducción del motor, seguido de asegurarlo con abrazaderas plásticas, para asegurarse que no presente ninguna filtración de aire en la figura 2-6 se puede visualizar el sensor MAF de tipo hilo caliente ya instalado entre la el filtro y la admisión del motor.

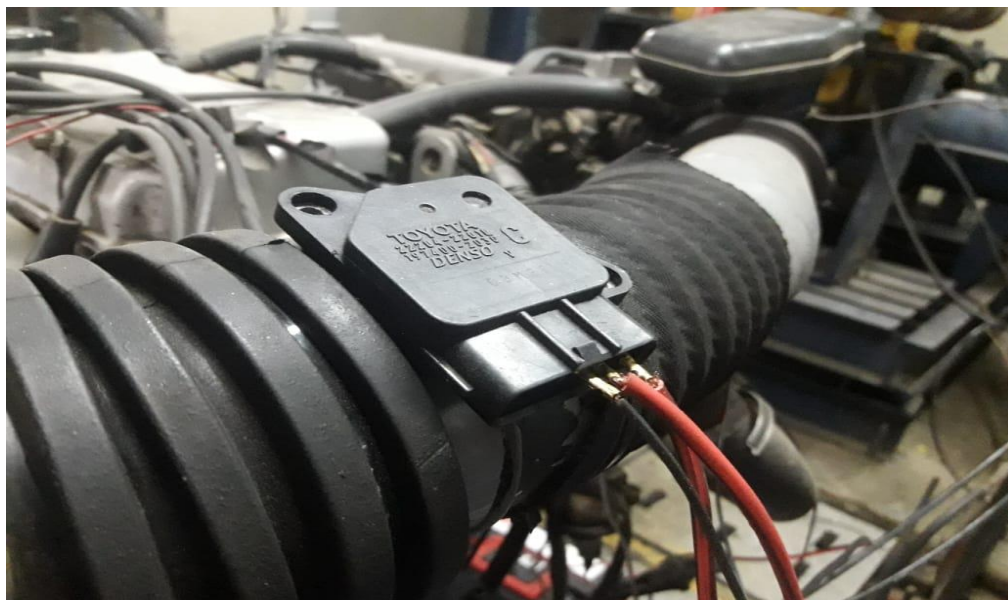


Figura 2-6. Instalación del sensor MAF tipo hilo caliente en el sistema de admisión. Fuente, fotografía tomada en el Laboratorio de Máquinas.

Finalmente lo que resta, es conectar el sensor MAF tipo hilo caliente al circuito electrónico que está encargado de transformar la señal de voltaje a caudal másico de aire.

2.3 ESQUEMA DEL SISTEMA

Para la transformación de una señal de voltaje a flujo másico de aire es necesario un circuito electrónico que haga ésta transformación, además que sea capaz poder mostrar los datos resultantes.

Para la reparación del circuito es necesario tener disponible un esquema grafico de este.

En la figura 2-7 se muestra cómo se debe conectar el sensor al circuito integrado y la alimentación de cada uno de estos, en donde el sensor va conectado a una alimentación de 12 [V] y entrega una señal variable de voltaje, que irá como información al circuito integrado donde este cierra la conexión con la misma tierra que alimenta el sensor, también muestra la alimentación del circuito integrado la cual es de 5[V] que los entrega un transformador de corriente alterna a continua.

Para la identificación de los pines que van conectados en el sensor MAF tipo hilo caliente revisar el manual Toyota Yaris disponible en el taller de mecánica automotriz de la UTFSM, ya que solo van conectados 3 de los 5 pines que posee, lo que corresponden al sensor MAF tipo hilo caliente, los restantes 2 pines corresponden a sensor IAT.

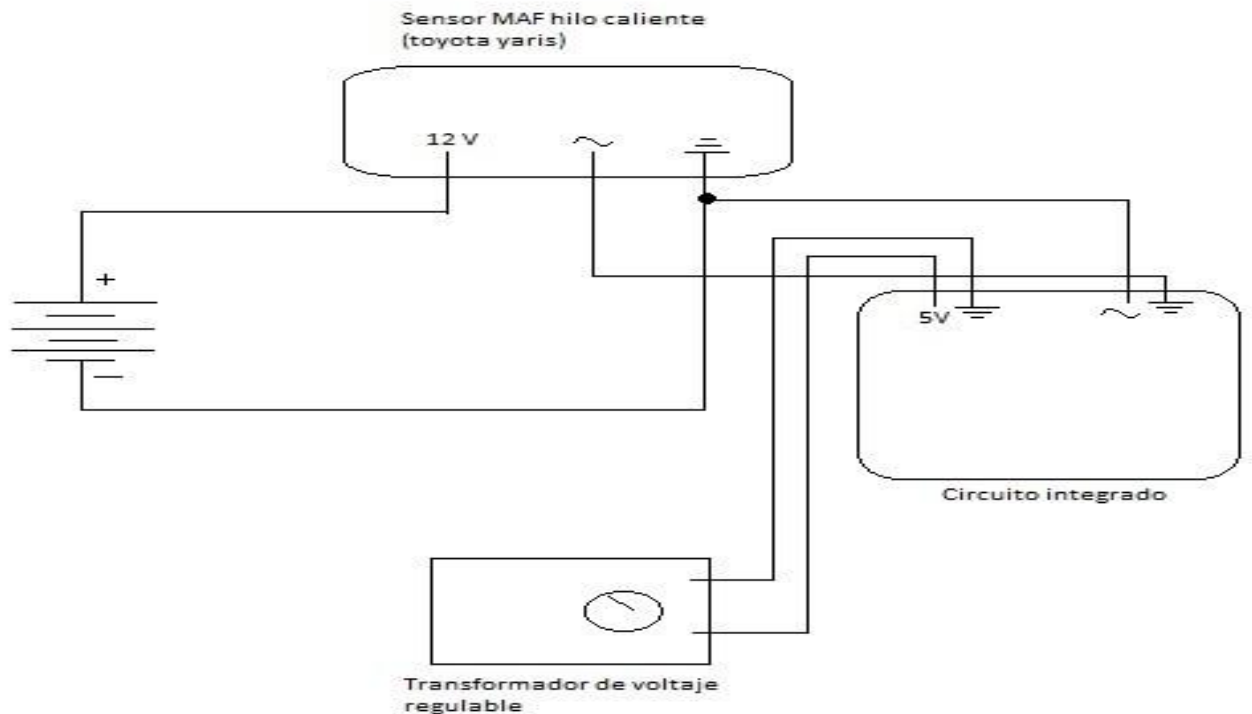


Figura 2-7. Circuito de conexión entre el sensor MAF hilo caliente y el circuito integrado..
Fuente, elaboración propia en Microsoft Word.

2.4 PROCESO DE CALIBRACION DE TUBO ANNUBAR Y MAF TIPO HILO CALIENTE.

Todo instrumento tiene una incertidumbre de medida propia de su estado y para calibrarlo es necesario contar con un elemento patrón como referencia, con un intervalo de medida cercano al que se quiere medir, cabe mencionar que el elemento patrón también tiene asociada una incertidumbre de medida propia de su calibración.

La calibración puede realizarse de dos maneras:

1. La forma más exacta es a base de realizar mediciones con el patrón en forma reiterada. Las repeticiones tienen que ser acotadas en un número de que asegure niveles de confianza razonables (entre 10 y 20 repeticiones según el libro de instrumentos industriales su ajuste y calibración [13]). El método se debe realizar en laboratorios acreditados, pero opcionalmente se puede realizar en procesos industriales, cuando se tienen necesidades puntuales de dicho proceso.

2. Una forma más simple es con el método de la confirmación de mediciones en puntos concretos de la escala, típicamente 0%, 25%, 50%, 75%, 100%. Este método es más común en procesos industriales [13].

Con el primer método una vez efectuadas las pruebas es posible definir la media, la varianza muestral y la incertidumbre de las mediciones de calibración.

patrón de calibración:

un patrón de calibración es una unidad de medida referencial estandarizada o un instrumento previamente calibrado en un laboratorio, que servirá como principal guía en el proceso de calibración: por ejemplo, para calibrar una balanza o pesa se tomarán elementos que vengan con un peso determinado y se colocaran en la pesa, esta deberá mostrar el peso que ya viene previamente determinado por el fabricante.

Incertidumbre de la medida:

Cuando se calibra un instrumento, este se compara con otro instrumento patrón para asegurar si el error (diferencia entre el valor leído por el instrumento a calibrar y el valor medido con el aparato patrón) está entre los límites puestos por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón también tiene un error e intervienen fuentes de error en proceso de calibración, no es posible caracterizar la medida por un único valor, esto se denomina incertidumbre de la medida.

Entre las fuentes de incertidumbre se encuentran:

- influencia de las condiciones ambientales.
- lecturas diferentes de instrumentos analógicos realizadas por los operadores.
- variaciones en las observaciones repetidas de la medida en condiciones aparentemente idénticas.
- valores inexactos de los instrumentos patrón.
- muestra del producto no representativa.

Calibración de medidores volumétricos.

Los medidores de flujo volumétrico pueden calibrarse en el lugar que están instalados si se puede intercalar otro medidor de flujo conectado en serie, este funcionara como elemento patrón para así comprobar las medidas [13].

Calibración de medidores de caudal de masa.

Estos se calibran en su propia instalación con el mismo fluido de trabajo que miden, con un caudal de masa constante, midiendo en un sistema receptor la masa del fluido y midiendo el tiempo transcurrido con un cronometro de exactitud. Pueden verificarse también instalados en el mismo lugar en donde operan instalando otro medidor patrón en serie.

El diseño de los medidores de caudal de masa esta echo para trabajar con incertidumbres de medidas establecidas dentro de la rangeabilidad del caudal (campo de caudal mínimo al caudal máximo).

Para los líquidos, un valor típico es 0.05% y en los gases de 0.09% ambos con un nivel de confianza de 95% [13].

rangeabilidad:

es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento, por ejemplo: un termómetro que mide con rango de 100°C a 300°C, la rangeabilidad es de $300/100 = 3$.

Proceso de calibración para los medidores de flujo de aire instalados en el laboratorio de motores.

Proceso para calibrar el tubo annubar:

Para calibrar el tubo annubar, se realizó un proceso de comparación con un anemómetro, se acotaron cierto número de rpm del motor para realizar mediciones, con un caudalímetro a la vez, ya que no se pudo conectar ambos en serie, porque la construcción de estos no lo permitió.

Luego de realizar las mediciones con ambos caudalímetros, se compararon y se encontraron diferencias muy grandes, las cuales se produjeron porque el elemento patrón (anemómetro de hilo caliente) presentaba una descalibración.

Por lo tanto, solo se pudo comparar las mediciones realizadas con el tubo annubar con las cantidades de flujo de aire calculadas teóricamente.

Proceso para calibración del MAF tipo hilo caliente:

Para la calibración del sensor MAF tipo hilo caliente se realizó una medición con el mismo sensor montado en un vehículo, al sensor se le midió al mismo tiempo el voltaje de señal hacia la ECU con un voltímetro y con el escáner la cantidad de aire entrante aspirada por el motor, con estos datos se elaboró una gráfica la cual fue introducida a un chip puesto en un circuito integrado con la tarea de cambiar esta señal de voltaje a un valor de flujo de aire, el cual es mostrado en una pantalla conectada al circuito integrado.

Los valores entregados por el sensor MAF tipo hilo caliente también fueron comparados con los datos calculados teóricamente, no se pudo calibrar de forma recomendada, ya que ocurrió lo mismo que con el tubo annubar al estar descalibrado el único elemento patrón con el que se contaba.

2.4.1 Paso a paso del procedimiento realizado por el proveedor

Para la calibración del tubo annubar resultó necesario contactarse con el proveedor del freno mediante el programa TeamViewer, dado que es proveniente de Argentina. Él, desde su país, tomó el control del computador en donde está instalado el software de freno dinamométrico de banco y comenzó la calibración entre el motor y el sistema de adquisición de datos se procedió a seguir los siguientes pasos:



Figura 2-8. Inicio de programa Saenz. Fuente, fotografía tomada en el laboratorio de máquinas.

1-. Abrir el software SMAC.

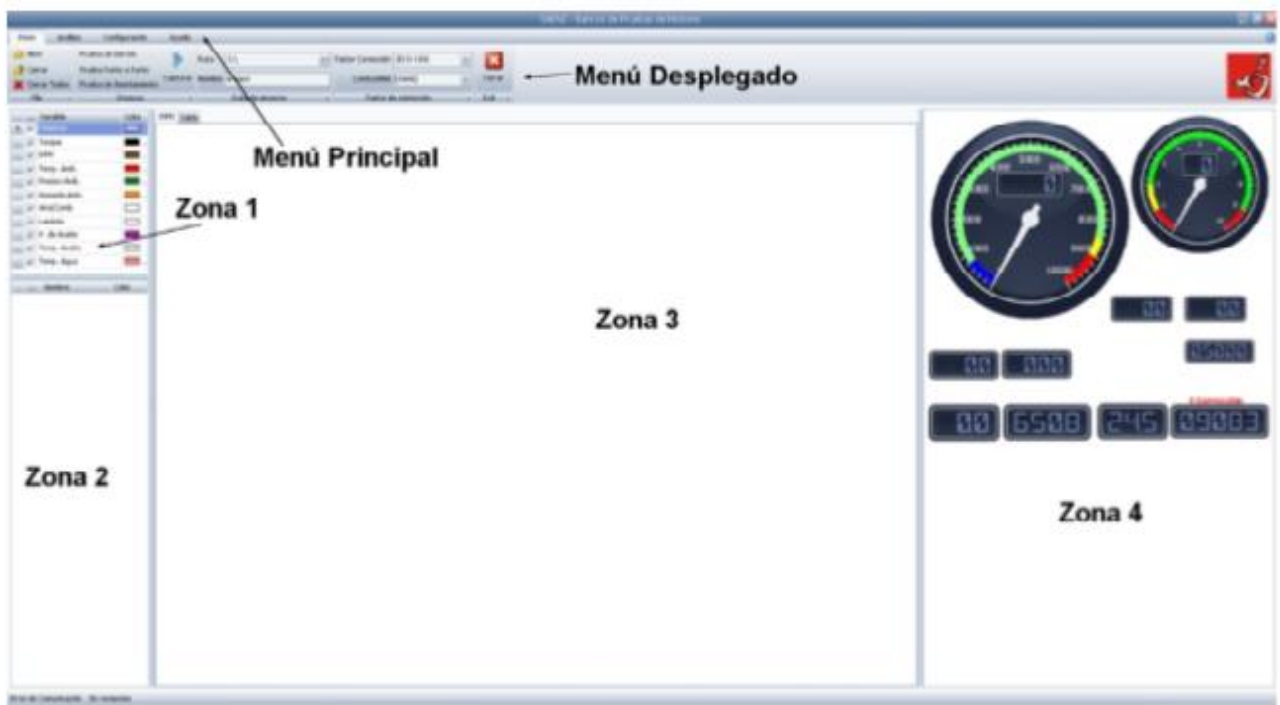


Figura 2-9. Software SMAC. Fuente, fotografía tomada en el laboratorio de máquinas.

2-. Revisar en qué auxiliar (enchufe) está conectado el sensor de presión diferencial en el sistema de adquisición de datos como se muestra en la figura 2-10.



Figura 2-10. Identificación de auxiliar. Fuente, fotografía tomada en el laboratorio de máquinas.

en el programa se detecta conectado el sensor de presión diferencial en el auxiliar 11, es por este auxiliar que se tendría que emitir la señal hacia la computadora.

3-. Se solicitó desconectar la entrada del sensor de presión diferencial (toma +), ya que a través de esto al introducirse aire por esta toma se puede verificar si el sensor emite alguna señal. Esto se realiza sólo con el fin de conocer si el sensor se encuentra funcionando, y con sus conexiones adecuadas, en el anexo 2 se pueden apreciar los datos del sensor de presión diferencial.

(TOMA+) (TOMA -)

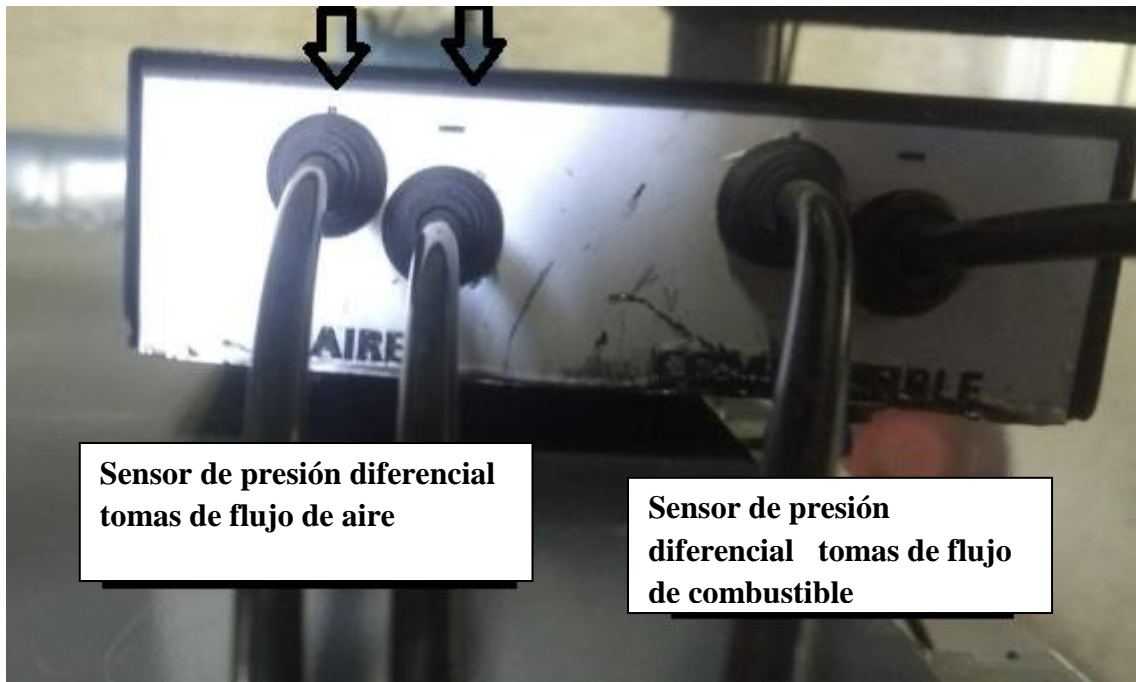


Figura 2-11. Identificación del sensor de presión. Fuente, fotografía tomada en el laboratorio de máquinas.

4-. El proveedor ingresó en el menú del software mediante el siguiente orden: configuración > sensores > añadir sensor, en donde con una clave que solo posee él, se añadió el sensor de consumo de aire, agregó la fórmula correspondiente para dicho sensor y los datos necesarios para añadirlo a la lista de sensores.

Tabla 2-1 Datos de la calibración del tubo anubar. Fuente, elaboración propia en Microsoft Word.

5.- DATOS DEL SENSOR	
Nombre	Consumo de aire
Formula:	$((\text{Sqrt}(((p-0.25)/0.45))*886)-15)/20$

Los valores de la fórmula corresponden a los adquiridos de la calibración del instrumento realizada por el fabricante, donde el flujo de aire es función de la raíz cuadrada de la

presión la cual estaría multiplicada por una constante donde las constantes podrían ser (diámetros, diámetros de la placa orificio, densidad del aire y otros factores).

La fórmula responde a la calibración de la señal de presión / flujo de aire realizada con un medidor de flujo normalizado en la fábrica Saenzdynos, Mar del Plata, Argentina, por ende, la fórmula obtenida de la calibración es la señalada en la tabla 2-1.

La señal de presión está leída con un sensor de presión cuya relación de presión voltaje está en el data sheet del sensor (revisar anexo 2).

2.5 ELABORACIÓN DE UN CIRCUITO INTEGRADO PARA LA LECTURA DEL SENSOR MAF TIPO HILO CALIENTE.

La elaboración de un circuito integrado para la lectura del sensor MAF tipo hilo caliente, es necesaria debido a que este sensor no se puede conectar al sistema de adquisición de datos que toma los parámetros de los demás sensores que están en el motor, y es mucho menos complejo que hacer modificaciones al sistema de adquisición de datos y al software del freno dinámico para poder conectarlo.

Para comenzar con la elaboración del circuito, se necesitan saber los parámetros en los cuales trabaja el sensor, estos se pueden obtener midiendo un sensor igual al adquirido que esté instalado en un vehículo. En este caso se llevó a cabo la medición en un Toyota Yaris que disponía la carrera de mecánica automotriz, el cual contaba con el sensor requerido.

Los pasos a seguir fueron los siguientes:

1. Con un multímetro se midió el voltaje de señal que arrojaba el sensor dependiendo de la cantidad de aire que circulaba.
2. Junto con el escáner se conoce que cantidad de aire va pasando a través del sensor, el cual muestra el flujo de aire en g/s.
3. Lo anterior se realizó con un soplador de hoja, para ver el rango mínimo y máximo de la señal del sensor con respecto a los datos del escáner, esto debido a que no se pudo probar el vehículo en marcha, por lo tanto la mariposa no abriría en un 100% ya que el motor no tendría carga, haciendo que el motor alcance altas RPM con poco consumo de aire

Ficha técnica del soplador de hoja

Tabla 2-2. Ficha técnica del soplador de hojas. Fuente, [11].

Soplador de hoja Makita UB1101						
Presión de aire	Volumen máximo de aire	Longitud total	Velocidad en vacío(min-1)	Peso neto	potencia	Volumen de aire
0-5.5 Kpa	0-2.8 m3/min	480 mm	0-16.00	1.9 kg	600 w	168 m3/h

Finalmente, con los datos obtenidos se llevó a cabo la elaboración de la Grafica 2-1 (curva polinómica voltaje v/s flujo másico de aire de admisión entrante al motor) la cual se encuentra en la página 31. Con estos datos y la fórmula que da este gráfico ya se podía llevar a cabo la construcción del circuito integrado.

Tabla 2-3 Presupuesto del circuito integrado. Fuente, elaboración propia en Microsoft Word.

Nombre	Cantidad	Precio SIN IVA
PIC16F88-1/P MCU 8B 7KB FLAH	1	\$ 3,592
LCD ALFANUMERICO 16X2 C/BL GREEN	1	\$ 3,556
REGLETA 2T PCB 10A p5mm AZUL H10mm	2	\$ 158
BASE DIP 18/0.3" PARA C. INTEGRADO	1	\$ 42
PLACA UNIV. PREPERFORADA 5 X 7 CMS.	1	\$ 348
	TOTAL IVA INCLUIDO	\$ 9,350

En la tabla 2-2 se pueden apreciar los valores de los elementos cotizados, y posteriormente comprados para el circuito integrado. Éstos fueron adquiridos de la siguiente página: VICTRONICS (para contar con más información referirse a la página de internet).[14]

2.6 ELABORACIÓN DE UN REDUCTOR DE FLUJO DE AIRE PARA EL ANNUBAR.

Una vez instalado el tubo annubar con sus datos y fórmulas respectivas con el fin de poder hacer una lectura correcta del flujo de aire que está ingresando hacia el motor, se procedió a poner en marcha el motor instalado en el freno dinamométrico de banco, notando en el momento que el annubar no arrojaba una lectura estable del flujo de aire cuando se encontraba en ralentí, dado que la masa de aire que estaba ingresando hacia el motor lo hacía con poca velocidad, por lo tanto el tubo de presión total no percibía el flujo de aire para crear una señal, por ende no entregaba ningún dato en el programa SMAC, por ello se tuvo que implementar un reductor, el cual hará un efecto Venturi acelerando el aire al reducir la sección de paso de este. Esto hace que el flujo de aire ejerza más velocidad frente al tubo de presión total del tubo annubar por tanto se puede obtener una lectura en estado de ralentí con este reductor.

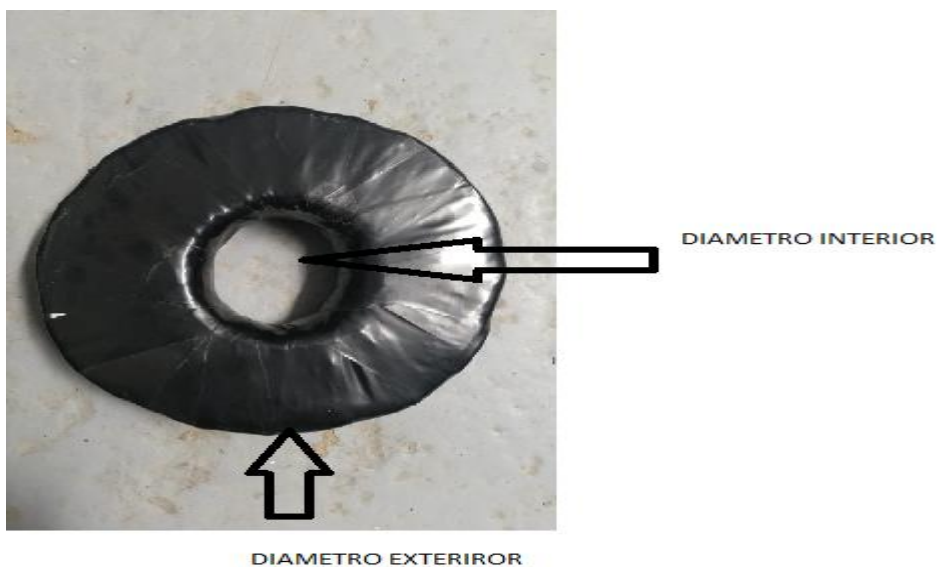


Figura 2-12. Reductor del tubo annubar. Fuente, fotografía tomada en el taller de mecánica automotriz

En la figura 2-12 se puede apreciar un reductor fabricado de plumavit que consta de un diámetro interior de 30 [mm] y un diámetro exterior de 100 [mm]

Este material fue fabricado con Plumavit, una vez que se adaptó y modificó a la medida del tubo annubar reduciendo el tamaño de la entrada de aire, quedando como se muestra en la en la figura 2-13.



Figura 2-13. Instalación del reductor en el tubo annubar . Fuente, fotografía tomada en el taller de mecánica automotriz.

Posteriormente se sellaron los orificios que no se utilizarían, dado que al poner el reductor que se hizo manualmente, los orificios restantes quedarían tapados por el adaptador , por esto se taparon con cinta negra evitando que provocaran una diferencia de presión, sin embargo, se dejó un orificio de lectura en los tubos del annubar ya que si se tapaban todos los orificios no podría haber una lectura del instrumento.

Luego de poner el reductor en el tubo annubar y sellarlo para que quedara sin fugas se procedió a hablar con el fabricante nuevamente para una re-calibración de la fórmula con el reductor en su interior, revisar anexo 3 para saber los valores del sensor.

CAPITULO 3: ENSAYOS CON EL MEDIDOR DE AIRE ADMISIÓN SOBRE UN MOTOR INSTALADO EN UN FRENO DINAMOMETRICO DE BANCO.

3.1 GUÍA DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE.

LABORATORIO FDB

ENSAYO DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE SOBRE EL FRENO DINAMOMÉTRICO DE BANCO

OBJETIVOS:

- Conocer los tipos de ensayos de consumo de aire.
- Estudiar medidores de flujo de tipo Hilo caliente y tubo Annubar.
- Realizar ensayos de medición de flujo de aire.

PRECAUCIONES:

- Antes de ingresar al laboratorio de ensayos se debe usar la ropa adecuada (overol y zapatos de seguridad).
- Revisar los niveles de agua y aceite antes de realizar las pruebas correspondientes en el motor ciclo otto del laboratorio de ensayos.
- Verificar el combustible y el estado de la batería antes de dar arranque al motor.
- Abrir las llaves de pasos correspondientes como: la de combustible y la de agua del freno.
- Verificar la conexión del sensor MAF de tipo hilo caliente para no dañar el circuito.

EQUIPAMIENTO:

- Sensor MAF de tipo hilo caliente, tubo Annubar.
- Mutt II.

DESAROLLO:

- ¿Que son los medidores de flujo de aire?
- ¿Para qué se utilizan los medidores de aire de admisión en un motor a combustión interna?
- Identificar las diferentes partes y conexiones del anubar y el sensor MAF de tipo hilo caliente para la comprensión de su funcionamiento.
- Realizar ensayos de punto a punto (consumo de aire, rendimiento volumétrico y de RAC), cabe destacar que para estos ensayos es importante tomar los valores técnicos del motor 4G13.
- Graficar valores arrojados en función del rpm.
- Analizar y comparar los valores entre los medidores de flujo.
- Realizar discusiones de resultados y hacer las conclusiones pertinentes.

3.2 PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE.

Un ensayo de medición de flujo de aire tiene por finalidad medir la cantidad de aire entrante al motor a distintos rpm y carga del motor, este dato puede ser utilizado para varias cosas, como, por ejemplo: analizar modificaciones de partes del motor que tengan relación con el sistema de admisión de aire, utilizar los datos obtenidos para calcular rendimiento volumétrico o RAC.

El ensayo se realizó en el motor a combustión interna que corresponde a un Mitsubishi 4G13 que se dispone en el Laboratorio de Máquinas de la carrera de Mecánica Automotriz, el cual presenta las siguientes características:

Ficha técnica

Año de fabricación:	1996.
Potencia:	56[kW] @ 6 000 rpm.
Diámetro x carrera:	71 [mm] x 82 [mm].
Cilindrada:	1298 [cm ³] (1,3 [l]).
Presión media efectiva:	1 034 [MPa].
Tipo de motor:	4 cilindros transversal SOHC.
Relación de compresión:	9.5/1.
Torque:	107 [Nm] @ 3 000 rpm.
Capacidad del estanque de combustible:	19 litros.

3.3 PROCEDIMIENTO PARA LLEVAR A CABO EL ENSAYO DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE EN UN MACI.

Acotar número de revoluciones en los cuales se quiere realizar la medición, esto se recomienda hacer, ya que el MAF tipo hilo caliente no se puede empalmar al sistema de adquisición de datos y no se puede tener una curva directa.

PASO 1: Inspeccionar visualmente que no exista ninguna pérdida de agua y aceite en el motor del freno dinamométrico y que sus respectivos niveles estén dentro del rango para poder operar el motor.

PASO 2: Abrir el paso de combustible y agua hacia el freno dinamométrico, posteriormente dar contacto, verificar el funcionamiento del sistema de adquisición de datos y encender el circuito integrado fabricado para el MAF tipo hilo caliente.

PASO 3: Dar marcha al motor para revisar que no tenga entradas de aire posteriores a los medidores de flujo de aire o algún vacío desconectado.

PASO 4: Una vez con el motor en temperatura de funcionamiento llevar la mariposa a un 100% de apertura y al mismo tiempo abrir la llave de paso que varía la carga del freno dinamométrico, para así dejar la cantidad de rpm fijas acotadas con anterioridad.

PASO 5: Ordenar datos obtenidos para así guardar los datos necesarios. Graficar y tabular datos para luego interpretar los valores

3.3.1 Procedimiento para llevar a cabo la medición de flujo de combustible.

PASO 1: Inspeccionar visualmente que no exista ninguna pérdida de agua y aceite en el motor del freno dinamométrico y que sus niveles estén dentro del rango para poder operar el motor.

PASO 2: Tomar una muestra del combustible para medir su densidad con los densímetros disponibles en el laboratorio.

PASO 3: Abrir el paso de combustible y agua hacia el freno dinamométrico, posteriormente dar contacto, verificar el funcionamiento del sistema de adquisición de datos.

PASO 4: Llenar la probeta a utilizar que puede ser de 250cc o de 125 cc (se recomienda dejar sobre el nivel, para así dar tiempo a comenzar el cronometraje). En caso de que la probeta no se llene sola, utilizar la bomba de vacío disponible en el pañol del taller.

PASO 5: Una vez con el motor en temperatura de funcionamiento llevar la mariposa a un 100% de apertura y al mismo tiempo abrir la llave de paso que varía la carga del freno dinámico, para así dejar la cantidad de rpm fijas acotadas con anterioridad.

PASO 6: cerrar la llave de combustible que conecta el estanque con el motor y abrir la llave que conecta la probeta con el motor. Cronometrar el tiempo que demora en consumirse la cantidad de combustible acotado, ordenar datos obtenidos para así guardar los datos necesarios.

Al realizar este tipo de ensayos se debe priorizar las medidas de seguridad de las personas deben usar la ropa adecuada para ingresar al laboratorio también se debe tener en cuenta los valores que indican el correcto funcionamiento del motor (T° de refrigeración del motor , presión de aceite) esto se debe monitorear con el escáner MUT II del laboratorio de máquinas una vez finalizado este ensayo se debe comprobar que los sistemas queden desconectados para así cuidar los elementos de laboratorio y mantenerlos de manera segura.

3.4 PARAMETROS A MEDIR Y A CALCULAR EN EL ENSAYO DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE

En el ensayo de flujo de aire se medirán los parámetros tanto del motor como de los instrumentos de medición que se disponen en el taller de mecánica automotriz.

- Parámetros del sensor MAF tipo hilo caliente:
 - Flujo masico de aire entrante al motor.

- Parámetros del tubo annubar:
 - Caudal de aire entrante al motor.

- Parámetros ambientales:
 - Humedad relativa del aire.
 - Temperatura ambiente.
 - Presión atmosférica.

- Parámetros del motor a combustión interna:
 - RPM.
 - Temperatura de aire de admisión del motor.
 - Torque.
 - Potencia.

- Datos a calcular:
 - Densidad del combustible
 - RAC por medio de la ecuación 3.1
 - Rendimiento volumétrico por medio de la ecuación 3.2

3.5 ENSAYOS REALIZABLES CON LA MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE.

Los ensayos que se pueden realizar con la ayuda de los medidores de aire de admisión son:

- Ensayo de RAC.
- Ensayo de rendimiento volumétrico.
- Ensayo consumo de aire.

Entre otros ensayos (revisar anexo 4 para saber los valores teóricos que puede tener el motor instalado en el FDB).

Se realizó el ensayo punto a punto con rpm fijas, ya que el sensor MAF tipo hilo caliente no está conectado al sistema de adquisición de datos y no se podrían obtener los datos variando las rpm en cambio con el tubo anubar si se podría hacer un ensayo variando las

rpm esto permite conocer el comportamiento del motor a diferentes velocidades de giro, pero la idea del ensayo es poder comparar resultados entre estos 2 medidores.

Se realizo el ensayo punto a punto con rpm fijas, cada 500 rpm, aunque puede llevarse a cabo en intervalos más acotados para obtener una mejor precisión.

3.5.1 Ensayo de RAC.

Para el ensayo de Relación aire combustible se debe realizar una división entre flujo másico de aire y flujo másico de combustible(calculado con una probeta de 250 cc, la densidad correspondiente al combustible utilizado y el tiempo del consumo de los 250cc cronometrados), para distintas RPM

$$RAC = \frac{\dot{m} \text{ aire}}{\dot{m} \text{ combustible}} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

3.5.2 Ensayo de rendimiento volumétrico.

Los resultados anteriores tendrán directa relación con los de este ensayo, debido a que son necesarios para calcular el Rendimiento Volumétrico dada la fórmula:

$$\text{Rendimiento volumetrico} = \frac{\dot{m} \text{ aire real}}{\dot{m} \text{ aire teorica}} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Para calcular la masa de aire teórica:

$$\dot{m} \text{ aire teorica} = \text{Densidad del aire} * \dot{v} \text{ aire} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

- Para calcular el flujo volumétrico del aire:

$$\dot{v} \text{ aire} = v \text{ unitario} * Z * N * i \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Donde:

Z= número de cilindros

N= rpm del motor

$i = 1$ en motores dos tiempos y 0.5 en motores cuatro tiempos

se debe tener en cuenta que para el ensayo de rendimiento volumétrico se debe acotar las rpm donde se realizaran las mediciones, porque para hacer el cálculo de flujo másico teórico se necesita como dato un número de rpm y este será el que se relacionara con el flujo másico medido, el cual debe estar medido al mismo número de revoluciones para realizar el cálculo. Para obtener una curva de rendimiento volumétrico se deben tomar varias mediciones y ordenarlas de menor a mayor número de revoluciones.

3.5.3 Ensayo de consumo de aire.

Para comenzar con este ensayo se debe tener en cuenta que se debe realizar con la mariposa 100% abierta y con carga variable, este ensayo puede ser de curvas características en caso de ser realizado con el tubo annubar, ya que este está conectado con el sistema de adquisición de datos. En cambio, los resultados obtenidos con el sensor MAF tipo hilo caliente no pueden ser empalmados al sistema de adquisición de datos, debido a esto se recomienda acotar una cantidad de mediciones a distintos rpm, dejar los rpm fijos y tomar los resultados que muestra la pantalla del circuito integrado que está conectado con dicho sensor.

3.6 ENSAYOS REALIZADOS CON LOS MEDIDORES DE AIRE DE ADMISIÓN.

A continuación, se muestran ensayos realizados con los medidores de aire de admisión instalados en un motor Mitsubishi 4g13.

Los ensayos realizados se harán utilizando dos medidores de aire, un tubo annubar y un sensor MAF de tipo hilo caliente.

Ensayo de consumo de Aire:

Tabla 3-1 Ensayos de consumo de aire en los medidores de flujo. Fuente, elaboración propia Microsoft Word.

RPM	Annubar	hilo caliente	Valores teóricos	% de diferencia
Unidad:	g/s	g/s	g/s	%
1000	7,8	6,7	10,01	16,4%
1500	9,86	10,7	15,52	-7,9%
2000	12,1	13,4	20,2	-9,7%
2500	14,1	15,9	25,25	-11,3%
3000	14,5	17,6	30,30	-17,6%
3500	15,5	23,4	35,30	-33,8%
4000	17,8	27,03	40,41	-34,1%
4500	19,7	32,2	45,46	-38,8%
5000	22,4	38,7	50,51	-42,1%

En la tabla 3-3 En este ensayo se muestra la cantidad de aire que entra al motor en distintos rpm al mismo % de aceleración en este caso al 100%

También se muestra el % de diferencia al comparar los dos medidores de flujo de aire de admisión en un motor a combustión interna dando como resultado a las 1000 RPM 6,7 (g/s) – 7,8 (g/s) con los medidores de flujo volumétrico y el valor teórico que se calculo

fue 10,01 (g/s) y el resultado a las 5000 RPM 22,4 (g/s) – 38,7 (g/s) el valor teórico fue de 50,51 (g/s) se hace visible que el consumo de aire medido no es el esperado, esto puede ser debido a que el instrumento patrón para calibrar los medidores de flujo de aire no se encontraba operativo lo que influye en el error de la lectura de los medidores de flujo de aire, también el motor presenta detonaciones con esto no mantiene los rpm estables por lo que dificulta más la realización de la prueba.

Con los datos medidos anteriormente, se obtiene la siguiente grafica a comparar:

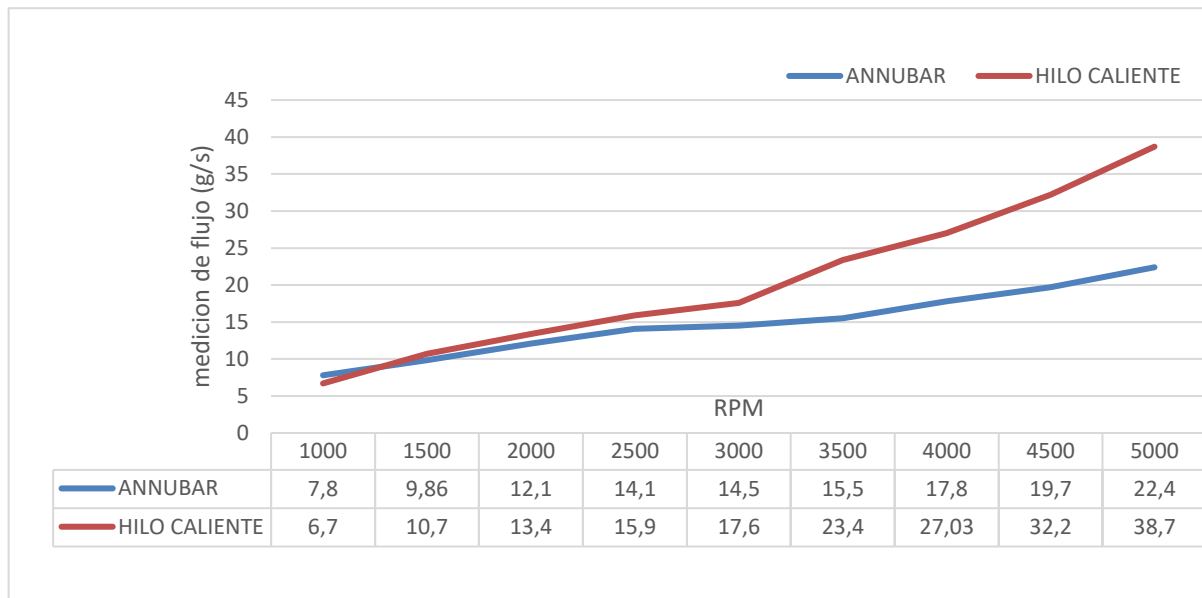


Gráfico 3-1. Curvas de consumo de aire de hilo caliente y annubar en función del rpm. Fuente, elaboración propia en Microsoft Excel.

En la gráfica 3-3 se muestra el flujo de aire entrante al motor respecto al rpm, el flujo de aire incrementa según el aumento de las rpm, pero también aumenta la diferencia entre mediciones, esta diferencia es producto de no poder llevar a cabo la correcta calibración de los medidores de flujo, manteniéndose el hilo caliente más cerca de los valores teóricos.

3.6.1 Discusión de los resultados de los ensayos.

- **Ventajas y desventajas de la utilización de cada uno de los sensores:**

El sensor MAF tipo hilo caliente tiene la ventaja de ser más pequeño y no invasivo en la zona del vano motor, su medición es más confiable, ya que es menos propenso a filtraciones de aire, este diseño para el uso en un motor a combustión interna ya que trabaja con los valores más comunes de alimentación y señal (5 [V]) también posee accesible a la persona.

La desventaja que puede tener el sensor MAF tipo hilo caliente es que con el tiempo sus conexiones se deterioren, que presente mucha suciedad por ende no podrá entregar una lectura adecuada.

El tubo annubar tiene la ventaja de que para la instalación en un freno dinamométrico de banco no presento inconvenientes respecto al espacio, pero al momento de calibrarlo y que el fabricante modificara el software del sistema de adquisición no se lograron obtener resultados de mediciones, sino hasta intervenir el tubo annubar al cual se le redujo su sección de paso, por otra parte, es un sensor que no necesita una alimentación eléctrica, por lo tanto, se puede usar en otras aplicaciones, no solo en el área automotriz.

Desventajas que puede tener el tubo annubar es que es muy grande para ser instalado en un motor a combustión interna que está en un vehículo, puede presentar filtraciones de aire por el tecalan y por la junta del reductor, el costo del tubo annubar es muy elevado.

Como conclusión se puede decir que es más conveniente instalar un sensor MAF tipo hilo caliente ya que está diseñado para un motor a combustión interna, también dicho sensor pose un costo más accesible para ser adquirido y es más difícil que presente filtraciones de aire lo que lleva a una medición más exacta. Respecto al rango este sensor que está dentro de los parámetros teóricos del motor y además también presenta una sobredimensión, es decir, puede medir flujos de aire más elevados que los aspirados por el motor, la resolución es la necesaria, ya que los datos obtenidos presentan una cantidad de decimales necesarios para la realización de cálculos, y su exactitud es bastante buena al ser del 1%.

- **Comparación de resultados de los sensores:**

La comparación de los sensores se llevó a cabo en la tabla 3-1 mencionada anteriormente.

Al comparar estos valores se tiene un porcentaje de diferencia de un 16.4% a un 42.1%, este se calculó tomando como referencia el sensor MAF tipo hilo caliente, ya que los

resultados son más fiables, porque se aproximan más a los valores teóricos que los del tubo annubar.

Al hacer los cálculos teóricos (revisar anexo 4) se esperaba tener resultados similares a los de estos dos sensores para así poder comparar las curvas obtenidas con los valores reales del motor.

Lo que no se esperaba fue tener valores totalmente diferentes en las 2 mediciones ya que no se pueden sacar cálculos precisos, ni las curvas correspondientes, tampoco se contaba con más instrumentos calibrados para medir el flujo de aire y compararlo con estos dos sensores y ver cual estaba más cercano a la realidad.

Ensayo de consumo de aire:

En el ensayo de consumo de aire se tomaron los valores entregados por los dos medidores en [g/s] dando valores que presentan una diferencia que va desde el 16.4% a un 42.1%, esta diferencia respecto a los dos medidores de flujo de aire, es a causa de que el elemento patrón de la calibración también estaba descalibrado y sin las mantenciones correspondientes, por lo tanto los medidores de flujo de aire no pudieron ser calibrados de forma correcta, con esto solo se pudo tomar una referencia de los valores calculados teóricamente y aproximar lo más posible estos medidores de flujo a dicha referencia.

Los valores comparados en la tabla 3-1 con respecto a las diferencias entre los medidores de flujos de aire y los valores teóricos son de:

- i. Annubar: aumenta su diferencia con respecto a las mediciones del motor variando su diferencia desde un 22% (100rpm) hasta un 56%(5000rpm).
- ii. MAF tipo hilo caliente su diferencia con respecto a las mediciones del motor variando su diferencia va desde un 33%(1000rpm) hasta un 23%(5000 rpm)

al comparar los resultados de los dos medidores de flujo de aire y contrastándolos con los valores teóricos el que más se aproxima a estos es el sensor MAF de tipo hilo caliente.

Lo que se esperaba era que los medidores de aire entregasen resultados próximos a los calculados teóricamente, esto afectara a las próximas pruebas ya que los resultados se verán alterados, ya sea por una medición no lo suficientemente exacta, por ende cabe

mencionar que se necesita la disponibilidad en el taller de un medidor de flujo de aire que se encuentre calibrado para utilizarlo de elemento patrón, se recomienda el equipamiento de un anemómetro, ya que su manejabilidad es más simple en base a su estructura, siempre y cuando este pueda medir entre los rangos de los motores que se encuentran disponibles en el taller, también en caso de no contar con alguno de los medidores de flujo de aire instalados en el laboratorio, se podrá contar con este para realizar alguna toma de datos.

3.6.2 Temas relacionados con el ensayo de medición de flujo de aire.

Dentro de la carrera de mecánica automotriz en la universidad técnica Federico santa maría los sensores instalados tendrán uso en la asignatura de laboratorio de mediante la medición del flujo del aire, lo que permitirá conocer a los alumnos cuanto flujo de aire que debe ingresar a un motor instalado en un freno dinamométrico hablando de un motor con las mismas características que se dispone en el laboratorio

El fin de querer implementar 2 sensores de flujo de aire de admisión (MAF tipo hilo caliente, tubo annubar) es para ser utilizado tanto por alumnos, docentes y cualquier persona que esté interesada en abordar los diferentes temas relacionados con la medición de flujo de aire.

CONCLUSIONES

Los instrumentos de medición de flujo de aire son elementos necesarios para la realización de ensayos de rendimiento volumétrico, relación aire combustible y flujo de aire entrante al motor. En este trabajo de título se redacta la instalación de dos medidores de flujo de aire en la entrada del sistema de admisión de aire en un motor de combustión interna instalado en un freno dinamométrico de banco.

Con la información recopilada en el estado del arte se logra la comprensión de la importancia de la medición del flujo de aire para un motor a combustión interna, en este caso instalado en un freno dinamométrico de banco, abarcando temas como la física básica del aire, mostrar distintos tipos de medidores de flujo de aire y su utilización, composición y funcionamiento de sensores MAF.

Respecto a la instalación es más fácil realizar la instalación de un tubo anubar disponiendo de todos los elementos para la lectura de sus mediciones, sin embargo al momento de realizar las mediciones este presentó más dificultad para realizar lecturas en bajas revoluciones del motor, con esto se debió reducir su sección de paso y por parte del fabricante realizar una modificación a la fórmula puesta en el software del freno dinamométrico, en cambio el sensor MAF tipo hilo caliente presentó más dificultades al momento de instalarse, ya que se requería de un sistema de lectura de flujo únicamente hecho para este sensor, ya que no se pudo empalmar al sistema de adquisición de datos.

Cabe mencionar que el proceso de calibración es muy importante, también se debe cerciorarse que el elemento patrón a utilizarse este calibrado, para así asegurar una correcta calibración de los instrumentos instalados, lamentablemente en el caso de la instalación de los medidores de flujo de aire, no se contó con un elemento patrón disponible en el taller, y el elemento patrón (anemómetro) conseguido con otra carrera de la universidad se encontraba sin sus mantenciones correspondientes, por lo que obligadamente se tuvo que tomar como referencia cálculos teóricos realizados con los datos del motor, en donde el sensor MAF tipo hilo caliente presentó una cercanía mayor a estos valores en comparación con el tubo anubar.

La calibración de los medidores de flujo de aire afecta directamente a los resultados de los ensayos realizados, esto se ve reflejado en el porcentaje de diferencia que existe entre ambos medidores de flujo de aire y entre estos comparados con los resultados teóricos, ya que al momento de realizar los ensayos los resultados de los ensayos de rendimiento volumétrico y relación aire combustible fueron muy distintos a lo que dice la literatura.

Seguir una metodología es importante para realizar el correcto procedimiento de medición de flujo de aire, esto ayudara a la persona que necesite información respecto al motor en cuanto se trata de rendimiento volumétrico, por ejemplo, cuando se quiere modificar el sistema de admisión de aire de un motor para alcanzar mayores prestaciones o saber detalle de la relación aire combustible en caso de que se necesite como por ejemplo saber la causa de altas emisiones contaminantes.

Este trabajo de título queda abierto por si otro alumno memorista quisiese realizar un trabajo de título relacionado con el flujo de aire del motor, con la calibración de los instrumentos usados en el laboratorio del freno dinamométrico y equipamiento del taller en cuanto a elementos que no estén disponibles, como por ejemplo equipos o elementos que puedan ser utilizados para realizar calibraciones y así poder corregir los resultados obtenidos en este trabajo de título.

BIBLIOGRAFÍA

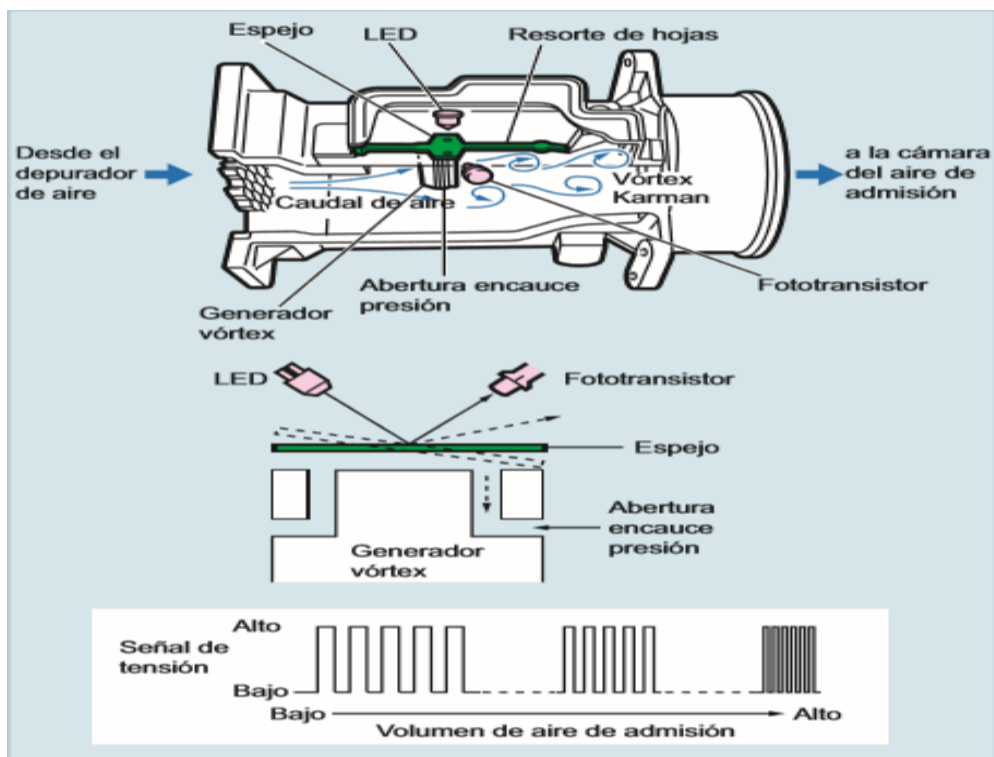
- [1] E-auto (2008) Sensor MAF y su funcionamiento. Disponible [En línea]: <http://www.e-auto.com.mx/enev/index.php/85-boletines-tecnicos/6882-sensor-maf> > [consulta 25 de agosto 2018]
- [2] Gatón, L., Galán, M., Navarrete, J., Sánchez, J. (1 de febrero de 2017). Actualidad Motor Disponible [En línea]: <https://www.actualidadmotor.com/sensor-maf-o-sensor-de-flujo-de-aire/>
- [3] Mitchell, L. (24 de mayo del 2017). Karman Vortex Air Flow Meter Terminal Identification. Disponible [En línea]: <https://www.toyotaguru.us/engine-control-systems/karman-vortex-air-flow-meter-terminal-identification.html> > [consulta el 15 de julio 2018]
- [4] Miller. Manual de reparación de automóviles. Edición 2012. Barcelona, España
- [5] Mott, R., Untener, J. Mecánica de Fluidos (versión en español) Séptima edición. México. Addison – Wesley. 2015.
- [6] Suministros Hidráulicos del Sureste. S.A. (5 de septiembre del 2017). Flujómetros: Tipos de medidores de flujo y aplicaciones. Disponible [En línea]: <https://suhissa.com.mx/flujometro-tipos-de-medidores-de-flujo-y-aplicaciones-parte-2/> > [consulta 10 de septiembre 2018]
- [7] VDI Verlag, GmbH, Düsseldorf, R. Bosch, GmbH. Manual de la técnica del automóvil tercera edición .1996.
- [8] Física termodinámica (16 de octubre de 2016). Tubo Pitot [En línea]: <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/segundo-corte/marco-teorico/tubo-pitot/> > [consulta el 12 de marzo del 2019]

- [9] Curso de vapor. Medida de caudal de vapor en instalaciones industriales (30 de octubre 2015). Tubo annubar [En línea]: <https://www.monografias.com/trabajos106/curso-vapor-medida-caudal-vapor-instalaciones-industriales/curso-vapor-medida-caudal-vapor-instalaciones-industriales2.shtml#top> >consulta [4 de marzo del 2019]
- [10] Toyota motor corporación Técnico de diagnóstico – Sistema de mando del motor de gasolina (2003).
- [11] Makita International Europa Ltd. Ficha técnica de soplador de hojas (30 de enero 2009) [En línea]: <https://images-eu.ssl-images-amazon.com/images/I/919001OUUES.pdf>
- [12] Creus, A. Instrumentación Industrial (edición en español) octava edición, Barcelona, España. Septiembre del 2010.
- [13] Creus, A. Instrumentos Industriales, su ajuste y calibración (edición en español) tercera edición, Barcelona, España. abril del 2009.
- [14] VICTRONICS respaldo y seguridad [En línea]: <http://www.victronics.cl/>

ANEXOS

Anexo 1: Karman vortex funcionamiento y estructura

Este tipo de caudalímetro de aire detecta directamente y ópticamente el volumen de aire de entrada. Comparado con el caudalímetro de paleta, se puede fabricar con un tamaño más pequeño y menor peso. La estructura del paso de aire también reduce la resistencia del aire de entrada. Un pilar (denominado el "generador de remolino") colocado en medio de un flujo uniforme de aire genera un remolino que se denomina "remolino Karman" hacia abajo del pilar. Como la frecuencia de remolino Karman generado es proporcional a la velocidad del flujo de aire, el volumen del caudal de aire se puede calcular midiendo la frecuencia del remolino. Los remolinos se detectan sometiendo la superficie de una lámina fina de metal (denominada "espejo") a la presión de los remolinos y detectando ópticamente las vibraciones del espejo mediante un acoplador óptico (un LED combinado con un transistor óptico). La señal del volumen de entrada (KS) es una señal de impulsos como se muestra en la imagen. Cuando el volumen de aire de entrada es pequeño, esta señal tiene una baja frecuencia. Cuando el volumen de aire de entrada es elevado, esta señal tiene una alta frecuencia



Anexo 2: sensor de presión diferencial

Éste es el sensor de presión que va ubicado en el interior de la caja negra, su función es transformar una señal de presión a una señal de voltaje para así poder entregarla al programa SMAC en las unidades correspondientes todo esto va de la mano con la fórmula mencionada anteriormente.



Código del sensor diferencial: mpx5010DP / k034408

Datos del sensor de presión diferencial

Exactitud :	+/-5%
Presión de operación:	1.45 psi (10kPa)
Presión máxima:	5.8 psi (40 kPa)
Presión de operación máxima	+125 °C
Presión de operación mínima	-40°C
Alimentación de funcionamiento	5 mA
Voltaje de salida	0.2 a 4.7 V

Anexo 3: Datos del tubo Annubar

Diámetro de entrada: 200 [mm]

Diámetro de salida: 100 mm (3.9 pulgadas)

Diámetro de tubos: 6.5[mm]

Cantidad de orificios:5

el rango óptimo de medición es de 150 a 450m³/h

a precisión y repetibilidad está dentro del 1%

Éstos son los datos que nos son necesarios para que el proveedor pueda hacer la calibración conociendo de qué tipo de annubar se trata.

Anexo 4: Valores calculados para el motor del freno dinamométrico

VALORES TEÓRICOS QUE DEBERÍA CONSUMIR EL MOTOR

Flujo volumétrico	A	Flujo másico
38,4 m ³ /h		10,096g/s
57,6 m ³ /h		15,52g/s
76,8 m ³ /h		20,2g/s
96 m ³ /h		25,256g/s
115,2 m ³ /h		30,304g/s
134,2 m ³ /h		35,304g/s
153,6 m ³ /h		40,408g/s
172,8 m ³ /h		45,464g/s
192 m ³ /h		50,512g/s

Estos fueron los valores teóricos con las fórmulas correspondientes, con esto se pueden apreciar los valores teóricos que debería estar entregando el sensor en el motor.