



**DISEÑO DE SISTEMA PARA
PRUEBA DE FUGA DE SENSOR EGR**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. HUMBERTO FLORES MUÑOZ
ASESOR: DR. EDUARDO RUBIO CERDA**

AGUASCALIENTES, AGS. JULIO 2018

CONFIDENCIALIDAD DE LA INFORMACIÓN

Debido a derechos de privacidad de información proveniente de Sensata Technologies Aguascalientes, se omitieron las imágenes sobre la implementación de equipo de prueba de fuga diseñado para sensores *EGR*.

También se omite Información detalla de cómo opera el sistema de prueba de fuga *EGR* mediante método de Caída de Presión, y de cómo funciona el sensor *EGR* para proteger derechos de autor.

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



25 de junio de 2018

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno ING. HUMBERTO FLORES MUÑOZ, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: "DISEÑO DE SISTEMA PARA PRUEBA DE FUGA DE SENSOR EGR", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de MAESTRO EN MANUFACTURA AVANZADA durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 25 días de mes de junio del año 2018.

Dr. Eduardo Rubio Cerda
Asesor Académico

Ing. Edgar Omar Mora
Asesor en Planta

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Santiago de Querétaro, Qro.
27 de Julio del 2018

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora
Posgrado CIATEQ
PRESENTE.


Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del Ing. Humberto Flores Muñoz, del trabajo titulado:

“DISEÑO DE SISTEMA PARA PRUEBA DE FUGA DE SENSOR EGR”

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el estudiante antes mencionado, el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de ésta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

ATENTAMENTE



Maestro José Martín Melchor Leal
MELM671126HQTLR00

RESUMEN

Sensata Technologies es una de las empresas más importantes de su ramo en la industria automotriz, en la cual se fabrican sensores *EGR (Exhaust Gas Recirculation)*, cuya función es medir la temperatura de los gases que genera el sistema *EGR*. Para evitar rechazos del cliente por defectos de fuga que presenta el sensor y el constante crecimiento de demanda, se tiene como objetivo diseñar un sistema que sea capaz de verificar automáticamente que el sensor cumpla con las características de fuga requeridas por el cliente, y que sea lo suficientemente robusto y operable en una línea de producción.

Se buscó comprobar mediante diversos experimentos que el método de "Caída de Presión" puede detectar todos los posibles modos de fuga que pudiesen ocurrir en el sensor. Los primeros estudios consistieron en realizar pruebas con diversos tipos de gases, presiones, evaluar tipos de transductor, para determinar una metodología confiable para realizar la prueba de fuga en el sensor *EGR*.

Una vez que se determinó el tipo de gas, la presión y el transductor más óptimo para realizar la prueba, se construyeron sensores en condiciones sin falla (sin fuga), para verificar la precisión del sistema en la detección de piezas buenas. Al procesar todas las muestras, se calcularon límites de proceso con piezas buenas, mediante el estudio de gráfico de control, para determinar el valor óptimo en el cual el sistema puede diferenciar las partes buenas de las defectuosas.

Una vez definidos los límites de tolerancia para detección de piezas defectuosas, se realizó un estudio de capacidad de proceso para confirmar que el nuevo sistema de caída de presión es estable.

De los resultados de los estudios estadísticos y de los experimentos de laboratorio con el método de "Caída de Presión", se demostró que la operación de este método en una línea de producción es confiable.

Palabras clave: Ingeniería y Tecnología, Tecnología industrial, Procesos industriales, Transductores, Estadística.

ABSTRACT

Sensata Technologies is one of the companies most important of its field in the automotive industry, in which are fabricated EGR (Exhaust Gas Recirculation) sensors, which function is to measure the temperature of the gases that generates EGR system. To avoid customer returns due to leak defects that sensor presents and constant demand growth, the goal is to design a system that be capable to verify automatically that the sensor meets with leak characteristics required by customer, and that be enough robust and operable in production line.

It was sought to demonstrate through different experiments that the method "Pressure Decay" can detects all possible leak modes that could occur in the sensor. The initial studies consisted on perform tests with different gases, pressures, evaluate type of transducers, to determine a reliable methodology to perform leak test on EGR sensor.

Once that was determined the type of gas, pressure and the most optimal transducer to perform the test, were built sensors in conditions without any failure (without leak), to verify the system accuracy in the detection of good pieces. When all samples were processed, process limits were calculated with good samples, through the control graphic study, to determine the optimal value in which the system can differentiate good parts from defective parts.

Once the tolerance limits were defined for detection of defective pieces, a process capacity study was done to confirm that new system of Pressure Decay is stable.

From the results of statistics studies and the laboratory experiments with method of "Pressure Decay", was demonstrated that the operation of this method in production line is reliable.

Keywords: Engineering and Technology, Industrial Technology, Industrial processes, Transducers and statistic.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Aplicaciones de sensores y controles	1
Fig. 2. Sensor EGR con corte transversal	3
Fig. 3. Composición de los gases de escape en motores de gasolina y diésel	8
Fig. 4. Combustión de la mezcla y emisiones de escape	8
Fig. 5. Simulación de modelo EGR	14
Fig. 6. Sensor EGR	15
Fig. 7. Sensor EGR y sus componentes: End cap, Termistor, sello interno y conector.....	16
Fig. 8. Relación de resistencia y temperatura con termistor NTC y RTD	17
Fig. 9. Esquema de un transductor	18
Fig. 10. Diagrama de bloques de un transductor de presión	19
Fig. 11. Configuración de transductor	20
Fig. 12. Salida de voltaje proporcional a presión de transductor	21
Fig. 13. Presiones a nivel absoluto y relativo	22
Fig. 14. Galga extensométrica	23
Fig. 15. Efecto piezorresistivo	24
Fig. 16. Relación entre esfuerzos y deformación	25
Fig. 17. Efecto de tensión en galga extensométrica	26
Fig. 18. Diagrama de puente de Wheatstone	28
Fig. 19. Guía para selección de prueba de fuga	31
Fig. 20. Espectrómetro de masas	32
Fig. 21. Prueba de burbujas con fluorocarbono	34
Fig. 22. Sistema de vacío conectado a detector de fuga de helio	35
Fig. 23. Diagrama de método "caída de presión"	36
Fig. 24. Nivel de fuga a diferentes presiones	37
Fig. 25. Sistema de caída de presión	41
Fig. 26. Sensor EGR con sello interno dañado	44
Fig. 27. Sensor EGR con fibra en sello interno	45
Fig. 28. Sensor EGR sin sello interno	45

Fig. 29. Prueba de Caída de Presión con Aire, Nitrógeno y Helio	52
Fig. 30. Prueba de Caída de Presión con Aire, Nitrógeno y Helio	53
Fig. 31. Prueba de Caída de Presión con Aire, Nitrógeno y Helio	53
Fig. 32. Nivel de fuga con diferentes modos de falla	55
Fig. 33. Nivel de fuga detectado por el sistema de "Caída de Presión"	57
Fig. 34. Nivel de fuga de sensores <i>EGR</i> con límite de control superior	58
Fig. 35. Nivel de fuga de principales modos de falla en sensor <i>EGR</i>	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. PPM actual debido a fuga en sensor <i>EGR</i>	4
Tabla 2. Conversión de niveles de fuga a diferentes gases	38
Tabla 3. Masa molecular de diferentes tipos de gases	39
Tabla 4. Matriz para selección de método para prueba de fuga	40
Tabla 5. Nivel de fuga entre intervalos	47
Tabla 6. Lectura de voltaje y presión de sensores	48
Tabla 7. Iteraciones para verificación de fuga y cálculo de error de fuga	54
Tabla 8. Fuga de piezas buenas	56
Tabla 9. Resultados de nivel de fuga con Caída de Presión	59

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia por el apoyo constante e incondicional que siempre me han brindado, y por haberme dado la formación y armas necesarias para llegar hasta este momento.

Al Dr. Eduardo Rubio Cerda por sus consejos, su guía, su tiempo cedido, paciencia y retroalimentación que siempre me dio para la culminación de este trabajo de grado.

Al Mtro. Martin Melchor por haberme apoyado y retroalimentado en mejorar este trabajo de grado.

GLOSARIO

- **Atm-cc/s.** Se refiere al nivel de fuga de un gas de un centímetro cúbico por segundo medido a presión atmosférica.
- **CPK.** Índice de capacidad de proceso. Se utiliza para comprobar la calidad de un proceso, admitiendo algunos límites en las especificaciones.
- **ECU.** Unidad de control de motor *ECU* (sigla en inglés de *engine control unit*).
- **EGR.** *Exhaust gas recirculation* o *recirculación de gases de escape*.
- **EM.** Espectrómetro de masa.
- **Euro 2.** Normas Europeas de emisiones que definen límites aceptables de gases en sistema de escape de vehículos.
- **Lambda.** Designa la proporción aire/combustible (en peso) en forma de mezcla que entra al cilindro de un motor.
- **EPA.** *Environmental Protection Agency* o Agencia de Protección Ambiental. Es una agencia que fue creada con el propósito de proteger la salud humana y el medio ambiente, estableciendo regulaciones que están basadas en leyes para disminuir la contaminación.
- **Fluorocarbono.** Son compuestos químicos que contienen enlaces carbono-flúor. La relativamente baja reactividad y alta polaridad del enlace carbono-flúor los dota de características únicas. Los fluorocarburos tienden a romperse muy lentamente en el medio ambiente y por tanto muchos se consideran contaminantes orgánicos persistentes. Muchos fluorocarburos comercialmente útiles también contienen hidrógeno, cloro y bromo.
- **Gas noble.** Los gases nobles son un conjunto de elementos químicos que comparten un rango determinado de características como ser monoatómicos, inodoros e incoloros en condiciones normales, no pueden congelarse, tienen altísimos puntos de ebullición y sólo pueden licuarse bajo grandes presiones.
- **Mezclas ricas.** El CO en los gases de escape es elevado ($\lambda < 1$).
- **Mezclas pobres.** El CO en los gases de escape es bajo ($\lambda > 1$).
- **NTC.** (*Negative Temperature Coefficient*) – Coeficiente de temperatura negativo.
- **PTC.** (*Positive Temperature Coefficient*) – Coeficiente de temperatura positivo
- **PPM.** Se refiere a la cantidad de unidades que hay por cada millón de unidades del conjunto.

- **RTD.** *Resistance Temperature Detectors* o Detectores de Temperatura con Resistencia son sensores para medir temperatura.
- **SI.** Sistema Internacional de unidades.

ÍNDICE

CONFIDENCIALIDAD DE LA INFORMACIÓN	I
CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR	II
CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
AGRADECIMIENTO	IX
GLOSARIO	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 OBJETIVOS GENERALES	4
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.6 HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	
2.1 FUENTES DE CONTAMINANTES	6
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE	7
2.3 EMISIÓN DE GASES EN EL SISTEMA DE ESCAPE	7
2.3.1 Monóxido de Carbono (CO)	9
2.3.2 Hidrocarburos (HC)	9
2.3.3 Óxidos de Nitrógeno (NOx)	10
2.3.4 Emisiones de Vapor	11
2.4 MANUFACTURA SUSTENTABLE	12
2.4.1 Gases de efecto invernadero (GEI)	12
2.4.2 Estrategias para implementación de manufactura sustentable	12
2.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA EGR	13
2.6 SENSOR EGR	14

2.7 PRINCIPIOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN.....	17
2.7.1 Transductores	18
2.7.2 Transductores de presión.....	20
2.7.3 Transductores de presión relativa y absoluta	21
2.8 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE TRANSDUCTOR DE PRESIÓN	22
2.8.1 Galgas extensométricas	22
2.8.2 Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas.....	24
2.8.3 Campos de aplicación de galgas extensométricas.....	26
2.8.4 Puente de <i>Wheatstone</i>	27
2.9 MÉTODOS DE PRUEBA DE FUGA DE SENSOR EGR.....	29
2.9.1 Prueba de fuga con Espectrómetro de masa.....	32
2.9.2 Prueba de burbujas.....	33
2.9.3 Medición ultrasónica	34
2.9.4 Sistema de vacío	35
2.9.5 Caída de presión	36
2.10 PRUEBA DE FUGA CON DIFERENTES PRESIONES Y GASES	37
2.10.1 Nivel de fuga a diferentes presiones.....	37
2.10.2 Nivel de fuga con diferentes gases.....	38
2.11 INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE: PRUEBA DE FUGA ÓPTIMA.....	39
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	
3.1- PRUEBA DE FUGA CON MÉTODO: CAÍDA DE PRESIÓN	41
3.2- CONVERSIÓN DE VOLTAJE A PRESIÓN PARA MEDICIÓN DE FUGA	43
3.3- PRUEBA DE FUGA CON HELIO, NITRÓGENO Y AIRE	44
3.4- TIEMPO ÓPTIMO PARA LA PRUEBA DE FUGA.....	46
3.5- GRÁFICA DE CONTROL PARA DEFINICIÓN DE LÍMITES DE FUGA.	48
3.6- ESTUDIO DE CAPACIDAD	50
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	
4.1 FUGA CON HELIO, NITRÓGENO Y AIRE.....	52
4.2 DEFINICIÓN DE TIEMPO DE PRUEBA.....	54
4.3 DEFINICIÓN DE LÍMITES DE CONTROL PARA PRUEBA DE FUGA.....	55
4.4 CAPACIDAD DEL NUEVO PROCESO	59
CONCLUSIONES.....	61

RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS.....	64

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Sensata Technologies fabrica sensores cuya finalidad es medir alguna magnitud y convertirla en una señal. Los sensores mejoran el rendimiento de los automóviles y los hace mucho más seguros para evitar un sobrecalentamiento, una condición insegura del aire acondicionado, etc. Sensata Technologies, desarrolla y produce termostatos de alta calidad y sensores de temperatura para proteger y monitorear componentes electrónicos y equipos de un sobrecalentamiento e enfriamiento. Sensata es de los principales líderes en el mercado en sensores para la industria automotriz y campo industrial (Fig. 1).



Fig. 1 Aplicaciones de sensores y controles. Mercado se basa en la industria automotriz, sistemas de aire acondicionado y campo industrial¹.

Sensata Technologies es el líder mundial en sensores y controles. Sensata produce alrededor de 17,000 diferentes productos y embarca alrededor de 1.3 billones de unidades por año.

¹ Sensata Technologies (2012).

Los sensores fabricados están compuestos principalmente de cerámica capacitiva y tecnología hermética para un amplio rango de autos y vehículos pesados. Los sensores mejoran la seguridad y ayudan al medio ambiente reduciendo las emisiones de gases.

El límite máximo de emisiones que arroja el motor de diésel fue reducido por las regulaciones internacionales, esto se lleva a cabo año tras año. Regulaciones de emisión como *International Convention for the Prevention of Pollution* han forzado a las empresas manufactureras a limitar las emisiones contaminantes, en particular las emisiones de Óxidos de Nitrógeno. Las industrias automotrices se encuentran en una situación en la cual necesitan reducir el nivel de óxido de nitrógeno que genera el vehículo, por lo cual es importante asegurar que el sensor fabricado cuenta con las características adecuadas de calidad y funcionalidad.

Para asegurar que el producto cuenta con las características adecuadas en cuanto a calidad y funcionalidad, existen diferentes normas internacionales para garantizar que el producto cumple con los requisitos de cliente y medio ambiente: ISO 14000, 14004, 14040, 14044. De esta manera el producto puede cumplir con las directivas que tienen como objetivo la reducción de emisiones en el transporte, para cumplir con lo establecido en el tratado de Kioto, *EPA*, etc., en donde se establece una reducción global de los principales gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global del planeta.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Hay consternación en sistema de calidad por el nivel de fuga de los sensores debido a que las especificaciones del cliente son cada vez más estrictas. En la industria automotriz el límite mínimo de fuga debe ser garantizado para cumplir con las especificaciones de diseño del sensor y éste pueda asegurar una correcta funcionalidad en su aplicación final.

También se han encontrado sensores con fuga interna en la aplicación final, ocasionados por daños cosméticos en el sello interno (Fig. 2). El sistema de fuga utilizado anteriormente para detección de fugas se conocía como "Prueba de burbujas". Este método era dependiente del operador y no era confiable puesto que no era capaz de detectar todos los potenciales modos de falla mencionados anteriormente.

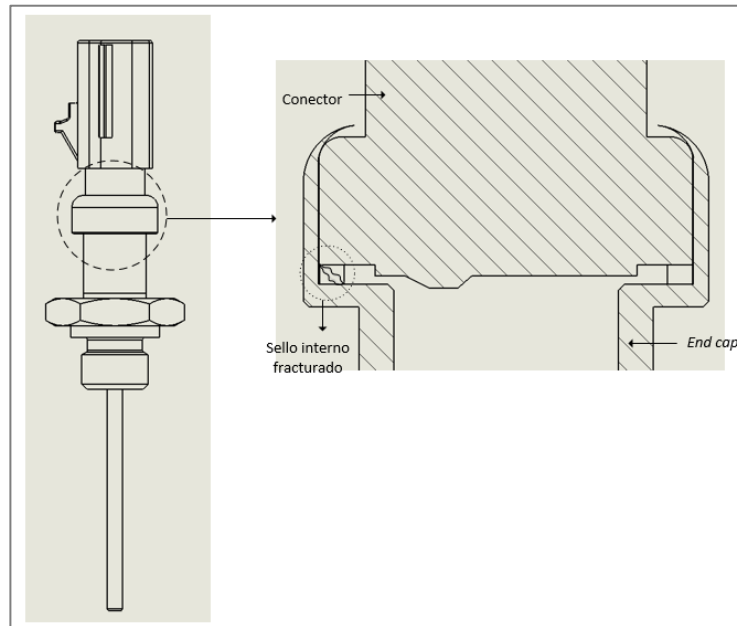


Fig. 2. Sensor *EGR* con corte transversal. Sello interno presenta rotura, lo cual podría ocasionar potenciales modos de falla en la aplicación final del sensor.

Cuando el sensor presenta fugas en la aplicación final con cliente, ocasiona falla en la medición de gases NO_x dentro del sistema *EGR*. Esta falla origina que el sistema de escape genere más contaminación de la permitida por las normas internacionales de protección al medio ambiente. Hasta el momento sólo se han detectado fallas con cliente durante pruebas que se realiza al sistema de *EGR*, antes de que el vehículo sea entregado a usuario final.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los seres humanos buscan día a día una mejor calidad de vida, ante este desafío se ven las industrias automotrices en producir productos que requieran de una menor cantidad de recursos, así como también emitan una menor cantidad de contaminación. El cuidado del medio ambiente mediante el uso de productos poco contaminantes generaría una gran ventaja competitiva en cualquier tipo de industria.

Uno de los principales problemas críticos que las industrias manufactureras deberían de considerar para mantenerse en la competencia, es mantener una alta calidad del producto, reduciendo costos y protegiendo al medio ambiente. Se sabe que los requerimientos para las operaciones manufactureras a través de la sustentabilidad

ambiental son más exigentes con el paso de los años. La manufactura sustentable promueve eliminar los desperdicios a través de prácticas eco-eficientes, adoptando nuevas tecnologías ambientales.

Sensata Technologies es de las empresas con más importancia en la industria automotriz, más, sin embargo, aún se presentan rechazos del cliente por material defectuoso, hablando específicamente del sensor *EGR*. Cuando el sensor presenta fugas pequeñas, no pueden ser detectadas con el sistema de prueba de burbujas, por lo cual es importante implementar un método sustentable, económico, confiable y robusto.

El sistema actual (prueba de burbujas), genera un alto costo por su mantenimiento y por la pobre calidad del producto. Aproximadamente se invierten alrededor de 120K USD/año para mantenimiento del sistema de prueba de burbujas, y los PPM por fugas del sensor es por arriba de 100.

Con un nuevo sistema se buscará reducir los costos por debajo de 10K USD/año y reducir los PPM a 0 por fugas del sensor. La Tabla 1 muestra los PPM actual y esperado con nuevo sistema.

Sistema	Costo (K USD)	PPM por fugas
Prueba de burbuja	120	>100
Nuevo sistema (Objetivo / Resultados esperados)	<10	0

Tabla 1. PPM actual debido a fuga en sensor *EGR*. Expectativa con nuevo sistema es alcanzar 0 PPM.

1.4 OBJETIVOS GENERALES

Implementar un sistema de prueba de fuga sustentable y que sea lo suficientemente eficiente para detectar todas las posibles causas que puedan originar una fuga en el sensor, así como también automatizar el proceso para que la detección de fuga sea independiente del operador.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Debido a la alta demanda de sensores *EGR* y sustentabilidad económica que requiere el sistema actual, el cual no es efectivo, se busca cumplir con los siguientes puntos para que el sistema sea rentable y sostenible:

- Costo bajo de fabricación.
- Método automático.
- Método eco-eficiente.
- Bajo tiempo de ciclo.
- Bajos costo de mantenimiento.
- Nivel de detección de fuga efectivo.

1.6 HIPÓTESIS

Es posible la implementación de un sistema semi-automático para la detección de todos los modos de falla que pueden originar fuga en el sensor *EGR*, mediante el sistema "Caída de Presión".

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

El principal objetivo teórico se basará en entender los diferentes tipos de fuga que puedan implementarse para probar el sensor *EGR*, para evaluar un método eco-eficiente, de bajo costo de mantenimiento, un proceso que sea lo más automatizado posible y que cumpla con los criterios de calidad del producto.

También es importante evaluar la aplicación del sistema y sensor *EGR*, fuentes de contaminación que produce el sistema *EGR*, y en que consiste una manufactura sustentable, para poder determinar el mejor método de prueba de fuga que se adapte a las necesidades del usuario final y de la empresa manufacturera.

2.1 FUENTES DE CONTAMINANTES

Se entiende por contaminación la presencia en un determinado medio (aire, agua, etc.), de elementos químicos ajenos a su composición, capaces de alterar sus propiedades y la posibilidad de su utilización. La contaminación atmosférica ocupa un lugar de relevancia, en concentraciones superiores a los límites, reducen el bienestar fisiológico del hombre y, en los casos más críticos, perjudican también a la vegetación y a los objetos.

Principales fuentes de contaminación son: Contaminación industrial, contaminación doméstica y contaminación vehicular.

Principales fuentes contaminantes vehiculares son:

- Carter: por la evacuación al exterior de vapores de aceite y gases quemados.
- Evaporación: de gasolina del depósito y del carburador.
- Escape: Productos de la combustión.

La industria de la manufactura mundial es responsable de una parte significativa del consumo de los recursos y de la generación de desechos. A nivel mundial, el consumo de energía de la industria de manufactura creció en un 61% de 1971 al 2004 y equivale a casi un tercio del uso global energético. Igualmente es responsable del 36% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE

En un vehículo en funcionamiento, que tiene un pistón deslizándose por el cilindro de punto superior a inferior, el pistón sella el cilindro junto con los anillos los cuales se ajustan perfectamente a la circunferencia del cilindro y se ajustan perfectamente a la estructura del pistón, de esta manera cuando el pistón baja hacia punto inferior crea un vacío, el cual es llenado con aire y combustible cuando la válvula de admisión se abre mientras el pistón desciende, por esta razón los motores aspiran aire y también se les llama aspirados o atmosféricos pues al crearse vacío dentro del cilindro la propia presión atmosférica se encarga de llenar el cilindro.

La proporción de aire-combustible correcta que debe entrar al cilindro cuando la válvula de admisión comienza a abrirse, y el pistón comienza a descender por el cilindro, es por lo general 14.7 partes de aire por 1 de combustible. A esta cantidad o proporción se le conoce como mezcla estequiométrica o mezcla ideal. Es decir, para que 1 parte de gasolina en peso se oxide perfectamente (combustión), necesita la aportación de 14.7 partes de aire en peso:

- 14.7 (Gasolina) → 1 (aire)

Si en un caso dado la proporción de la mezcla es 1:15.3, el factor lambda es igual a $15.3/14.7 = 1.04$, lo que en este caso se denomina mezcla pobre. Esta situación es la adecuada para lograr consumos mínimos y emisiones mínimas contaminantes. Si en el caso contrario se tiene 1:13.3, se obtiene una mezcla rica y el resultado es igual a $13.3/14.7 = 0.90$. En este punto de mezcla rica, el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes son mayores.

2.3 EMISIÓN DE GASES EN EL SISTEMA DE ESCAPE

En diversas partes del mundo se verifican las emisiones de diversos gases contaminantes para determinar si el vehículo es factible de pasar dentro de los mínimos o rangos que se tengan establecidos. En la mayoría de los programas se verifican principalmente dos tipos de contaminantes: el monóxido de carbonos e hidrocarburos. Sin embargo, en áreas en donde el sistema de emisiones es más exigente se examinan también los óxidos de nitrógeno y la operación del Sistema de Control de Emisiones de Vapor (el cual captura y retiene los vapores del tanque de combustible).

En la Fig. 3 se muestra la cantidad de contaminación en porcentaje que se genera en motores de gasolina y Diesel.

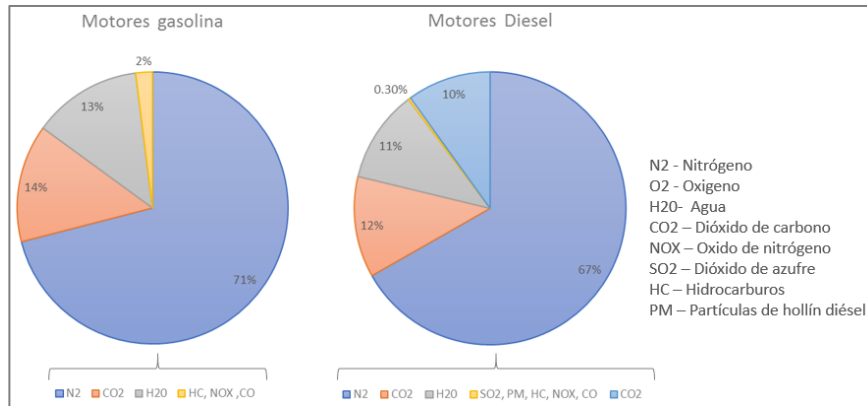


Fig. 3. Composición de los gases de escape en motores de gasolina y diésel.

El motor de combustión interna, por su forma de funcionar, no es capaz de quemar de forma total el combustible en los cilindros. En combinación de aire y Gasolina, se genera una combustión de mezcla, la cual contribuye a las emisiones de gases tóxicos y no tóxico en sistema de escape (Fig. 4). Pero si esta combustión incompleta no es regulada, será mayor la cantidad de sustancias nocivas expulsadas en los gases de escape hacia la atmósfera. Dentro de los gases generados en la combustión, hay unos que son nocivos para la salud y otros no.

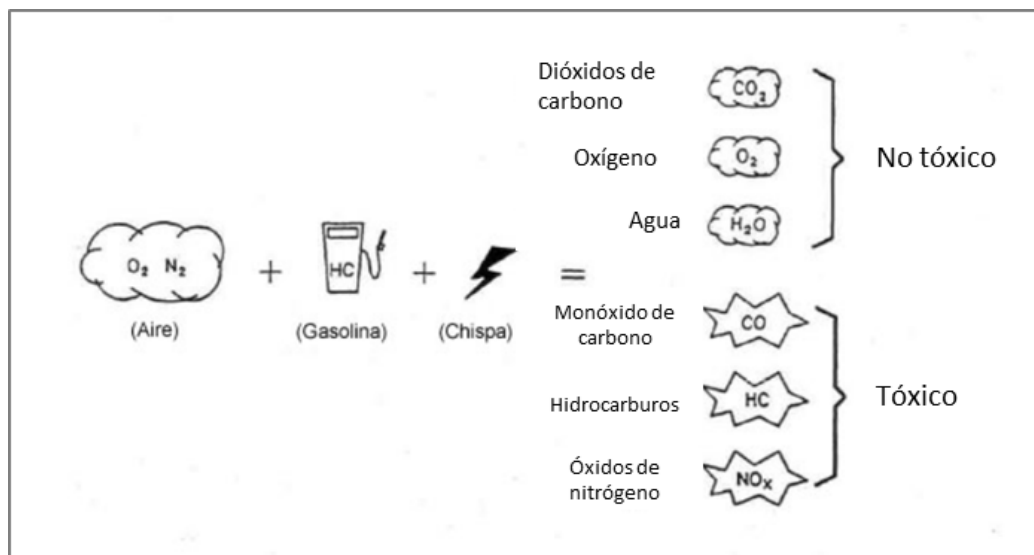


Fig. 4. Combustión de la mezcla y emisiones de escape².

² Anónimo (2014).

2.3.1 Monóxido de Carbono (CO)

De los tres principales contaminantes el monóxido de carbono es el más peligroso porque no se puede ver u oler. Una concentración de 0.5% de CO en el aire puede poner a una persona inconsciente y matarla en un lapso de 10 a 15 minutos. Incluso una menor concentración porcentual (0.04%) puede causar dolores de cabeza y amenazar la vida de una persona tras varias horas de exposición.

El monóxido de carbono se forma cuando la mezcla de combustible es rica y hay poco oxígeno para quemar completamente todo el combustible. Entre más rica sea la mezcla de combustible, más grande será la cantidad de CO que se produce. Altas emisiones de CO indican una combustión incompleta típicamente causada por un mal ajuste en el carburador, un filtro de aire tapado, que la mariposa del carburador esté atorada, que el sistema de entrada de aire caliente esté defectuoso, falta de sensor de oxígeno, presión excesiva de combustible o un problema con la medida de inyección de gasolina entre otros.

Cuando el motor se enciende por primera vez (el propulsor está frío) la mezcla de combustible está más rica de lo normal y el convertidor catalítico aún no alcanza su temperatura de operación por lo que en este periodo se produce más monóxido de carbono que en cualquier otro. En el momento que el auto alcanza su temperatura normal o está caliente, la mezcla rica es menor (por ende, el CO baja) y el convertidor ya trabaja de manera óptima por lo que se encarga de transformar la mayoría del CO en dióxido de carbono (CO₂).

Mezclas ricas se deben a la falta de oxígeno y por lo tanto no se completa la combustión, por lo que el contenido de CO es elevado. Mezclas pobres es debido a la abundancia de oxígeno, y con esto se completa la combustión, por lo que el contenido de CO₂ es mínimo.

2.3.2 Hidrocarburos (HC)

Las emisiones de hidrocarburos son gasolina sin quemar y vapores de aceite. Aunque no son directamente dañinos, son los mayores contribuyentes para el smog y la contaminación por ozono. Los hidrocarburos en la atmósfera reaccionan con el sol y se

rompen para formar otros componentes químicos que irritan los ojos, las fosas nasales, garganta y pulmones.

Las emisiones de HC, las cuáles son medidas en partes por millón (PPM), se generan por una mala ignición (una bujía o un cable de bujía en mal estado), un pobre encendido (un incorrecto ajuste al carburador o fugas en el vacío que crean una mezcla pobre al momento del encendido), pérdida de compresión (por fuga o una válvula de escape quemada) o por un motor desgastado lo que causa que queme aceite (guías de válvulas, anillos o cilindros usados).

Para controlar las emisiones de hidrocarburos es necesario mantener la mezcla de combustible, ésta no deber ser ni muy pobre ni muy rica a la hora del encendido, se debe conservar la cámara de combustión completamente sellada (buenos anillos y válvulas) y mantener en buenas condiciones el sistema de ignición (cambiando las bujías y los cables de manera periódica).

Los HC que se producen en el motor son calcinados en el convertidor catalítico y se transforman a vapor de agua y dióxido de carbono.

2.3.3 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

El termino genérico NO_x incluye los siete grupos NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, y N₂O₅. Óxido de nitrógeno se deriva de nitrógeno y oxígeno durante la combustión a altas temperaturas.

Los NO_x se crean en temperaturas de combustión por arriba de los 1370°C, el oxígeno y el nitrógeno se combinan formando varios componentes llamados "óxidos de nitrógeno". Este evento ocurre normalmente cuando el motor tiene mucha carga y la válvula reguladora está completamente abierta.

Los NO_x en concentraciones pequeñas en partes por millón, pueden causar irritaciones en los ojos, nariz y pulmones, así como dolores de cabeza. En altas concentraciones pueden provocar bronquitis y agravar otras enfermedades relacionadas con los pulmones. Una vez en la atmósfera, reaccionan con el oxígeno para formar ozono (el cuál es también tóxico para respirar) y smog.

Para reducir la formación de los NO_x , se utiliza un dispositivo llamado Escape de Recirculación de Gas (*EGR* por sus siglas en inglés). Éste al recircular una pequeña cantidad de gas de escape y ponerlo de vuelta en la entrada de aire para diluir la mezcla de aire-combustible, se genera un efecto de "enfriamiento" en la combustión, manteniendo así las temperaturas por debajo de la formación de los NO_x .

A partir de 1981 en EUA y en motores posteriores a ese año con control computarizado, un convertidor catalítico especial denominado "*three-way*" se empezó usar para reducir los NO_x en el escape. La primera cámara del convertidor contiene una especial "reducción" que cambia los NO_x en hidrógeno y oxígeno. La segunda cámara retiene la "oxidación" la cual calcifica el CO y el HC también.

Junto con la acción solar y dióxido de azufre (SO_2) contribuyen a la aparición de la lluvia ácida. Estos ácidos empiezan por acumularse en las nubes y después caen al suelo con las gotas de lluvia; al caer atacan las hojas, destruyen la clorofila y provocan de esta forma la muerte progresiva de los bosques.

El control de los NO_x es el factor más importante que se puede plantear para una reducción de la contaminación ambiental.

2.3.4 Emisiones de Vapor

Los vapores de combustible que emanan del tanque pueden ser otra fuente de smog y contaminación del ozono. Es por ello por lo que en los últimos 20 años los tanques de combustible han sido mejor sellados para prevenir la pérdida de estos vapores. Un tanque de combustible debe tener cierta ventilación para que éste pueda "respirar" durante los cambios de temperatura y cuando el motor está trabajando. Para hacerlo, varias mangueras están conectadas a un frasco lleno de carbón, usualmente localizado en el compartimento del motor. Las partículas de carbón en el recipiente succionan y guardan los vapores cuando el motor no está trabajando. Después, cuando el motor es encendido, una "válvula de purga" se abre para direccionar los vapores al motor donde son quemados.

Si el frasco o algunas de las mangueras tiene alguna fuga (o la tapa de gasolina no está bien sellada) los vapores del combustible pueden escaparse a la atmósfera

rápidamente. La cantidad de contaminación realmente se acumula, especialmente durante la temporada de calor. En algunos centros de emisiones se chequea la presión del tanque de combustible, así como el flujo de la "válvula de purga".

2.4 MANUFACTURA SUSTENTABLE

La definición de sustentabilidad se refiere al uso de recursos para alcanzar las necesidades de la generación actual sin destruir el futuro de las siguientes generaciones para alcanzar sus propias necesidades. Sustentabilidad también tiene otros términos que aplican a política, economía, ética, etc. Este capítulo se enfocará en la sustentabilidad que aplicada a la manufactura.

Sustentabilidad se enfoca en reducir desperdicios. Desperdicio se refiere más a la degradación de la calidad de vida del producto. Los productos se pueden hacer más sustentables de diferentes maneras para las industrias manufactureras: reducir y ayudar al cliente para reducción de consumo de energía, agua y materia prima.

2.4.1 Gases de efecto invernadero (GEI)

Es un gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo. Este proceso es la fundamental causa del efecto invernadero. Los principales GEI en la atmósfera terrestre son vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x) y el ozono (O_3). Sin los gases de efecto invernadero la temperatura promedio de la superficie terrestre sería alrededor de $-18^{\circ}C$, en lugar de la media actual de $15^{\circ}C$. Las actividades humanas han producido un incremento del 40% en la concentración atmosférica del dióxido de carbono.

2.4.2 Estrategias para implementación de manufactura sustentable

La organización de estandarización (ISO) ha desarrollado la ISO 14000 para ayudar a las organizaciones a manejar los problemas de contaminación. Los estándares proporcionan una guía en los problemas actuales como los gases de efecto invernadero. Con base en esto se incorporan los problemas ambientales en el diseño del

producto y se tiene una mayor visibilidad de diferentes métodos de prueba dependiendo de la aplicación del producto. Algunas de las normas ISO que forma parte de la familia 14000 son [3]:

- ISO 14001 Gestión ambiental: Requerimientos con guía para su uso – proporciona los requerimientos básicos para gestión ambiental.
- ISO 14004 Gestión ambiental: lineamientos generales en principios, sistemas y técnicas de soporte – proporciona un lineamiento en los elementos básicos de una gestión ambiental y en su ejecución.
- ISO 14040 Gestión ambiental: proporciona una visión del ciclo de vida a través de un amplio rango de aplicaciones.
- ISO 14044 Gestión ambiental: Ayuda a guiar la preparación, ejecución y revisar el tiempo de vida del producto.

También se creó el protocolo de Kioto para reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Como se mencionó anteriormente, principales gases son dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de nitrógeno (NO_x), entre otros. En el protocolo se acordó una reducción de al menos un 5% de las emisiones de estos gases en 2008-2012 en comparación con las emisiones de 1990 [4].

2.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA EGR

La función de la válvula *EGR* es recircular parte de los gases que salen por el escape hacia la admisión, es decir, reintroducir los gases de la combustión del motor en los cilindros para así reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). La válvula *EGR* conecta los colectores de escape con los de admisión. La clave de la reducción de los óxidos de nitrógeno es el descenso de la temperatura en la cámara de combustión al recircular los gases de escape hacia ella.

Básicamente el sistema de control de la contaminación por recirculación de los gases de escape está hecho mediante un tubo que permite canalizar los gases de escape hacia el colector de admisión, junto con un intercambiador de calor para enfriar el gas quemado y una válvula, comúnmente llamada válvula *EGR*, que estabiliza la velocidad de los gases de combustión. El funcionamiento del sistema *EGR* (Fig. 5) se

rige por la señal de los sensores de temperatura (Sensores EGR), régimen del motor y carga de aceleración. En función de éstos la ECU del coche comandara el sistema EGR.

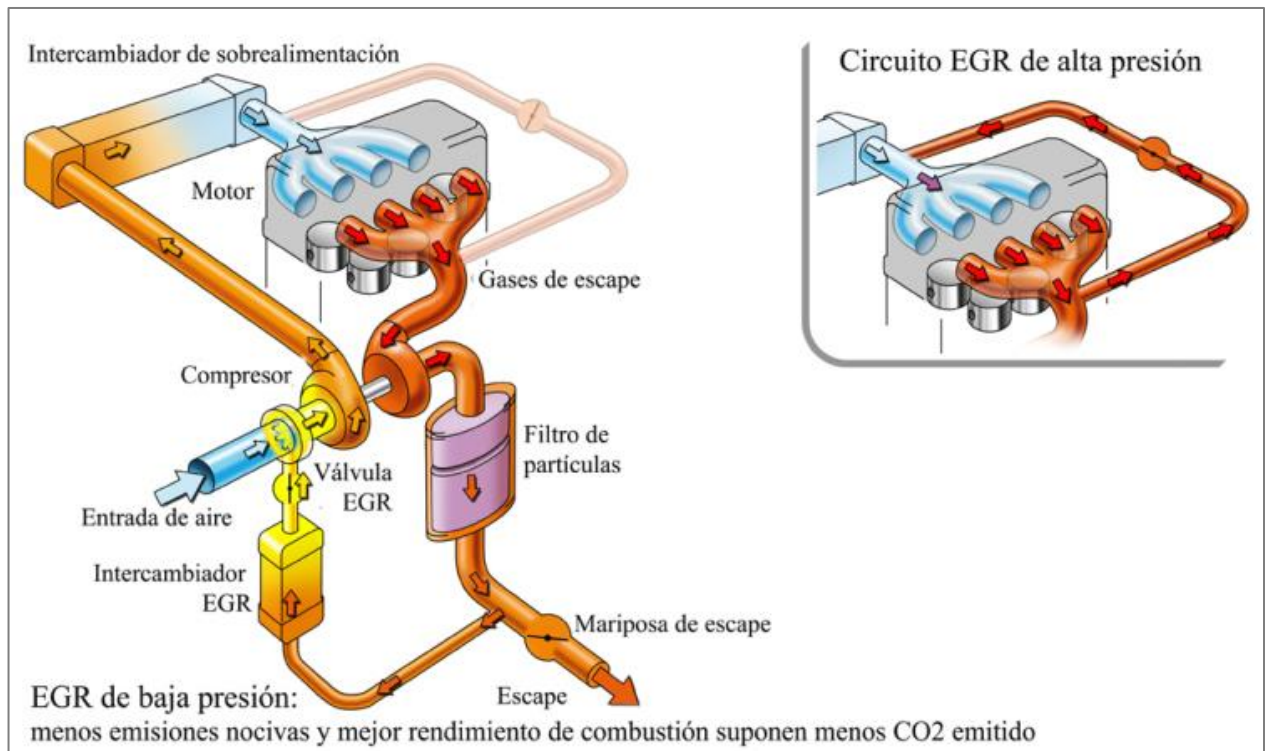


Fig. 5. Simulación de modelo EGR³.

Sensor EGR se encuentra dentro de válvula EGR, lugar donde realiza su primordial función, que es la medición de temperatura de los gases.

2.6 SENSOR EGR

La recirculación de gases de escape o EGR (en Inglés *Exhaust Gas Recirculation*) es un sistema utilizado desde principios del 1970, que consiste en redirigir una parte de los gases de escape de los motores de combustión hacia el colector de admisión, para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno.

La proporción de gas recirculado se adecua para cada motor sobre la base de los estándares de contaminación para respetar el equilibrio entre las emisiones de óxidos

³ Roncero (2012).

de nitrógeno y de partículas. El endurecimiento de las normas de emisión conllevó un aumento de la necesidad de usar la *EGR*.

Sensata Technologies fabrica desde inicios de año 2000, sensores *EGR* (Fig. 6) que miden temperatura del sistema, y garantizan la cantidad de emisión NO_x que cumpla con las normas internacionales.

Los fabricantes europeos han adoptado el sistema desde 1996 para cumplir con la norma europea Euro 2 sobre contaminación.

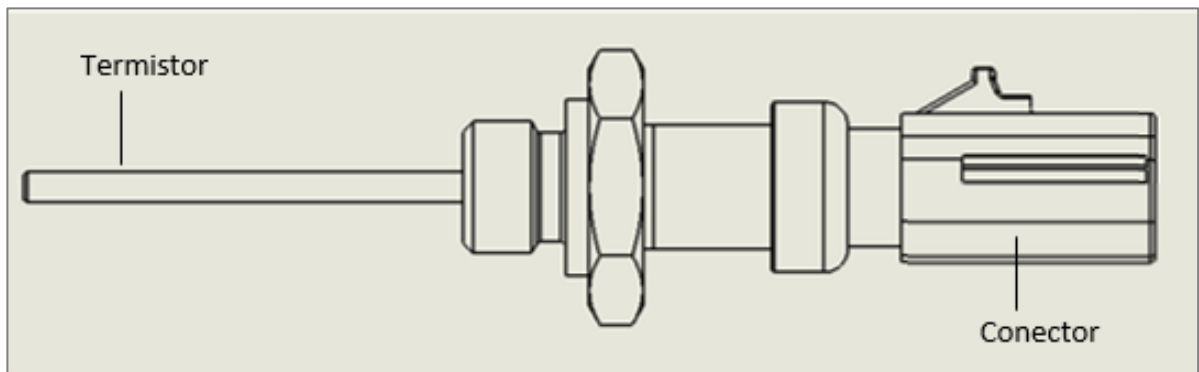


Fig. 6. Sensor *EGR*.

El sensor de temperatura (Sensor *EGR*) es usado para medir la temperatura de la salida de gases a la salida del enfriador del sistema *EGR*.

El sensor de temperatura *EGR* reporta cambios en la temperatura del sistema *EGR*. La información del sensor es utilizada para diagnósticos de emisión de NO_x . Si el sistema no detecta señal del sensor *EGR* o la señal es errónea del sensor *EGR*, podría indicar insuficiente recirculación de gas en el sistema de escape, lo cual podría ocasionar excesiva producción de NO_x hacia el medio ambiente.

El sensor *EGR* consta de los siguientes componentes: *End cap*, sello interno, conector y termistor. El termistor es el principal componente de donde se deriva el funcionamiento del sensor *EGR* para medición de temperaturas. Fig. 7 muestra a detalle las partes principales del sensor.

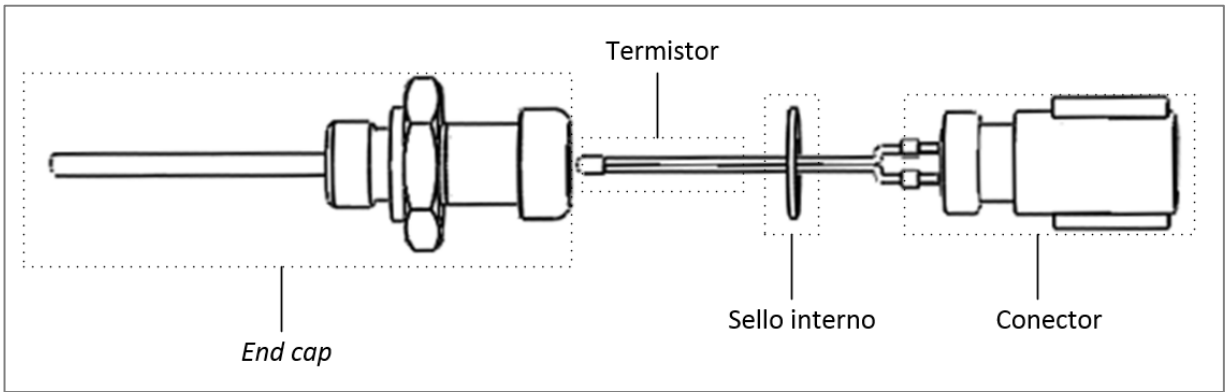


Fig. 7. Sensor EGR y sus componentes: *End cap*, Termistor, sello interno y conector.

El sensor *EGR* mide la temperatura con un componente llamado termistor. La palabra termistor procede del término "Resistor térmicamente sensible". Los termistores son sensores que cambian su resistencia cuando la temperatura varía, cuya función es similar a los *RTD*. En un termistor *NTC* la resistencia disminuye cuando temperatura incrementa. Un termistor *NTC* es comúnmente usado como sensor de temperatura. También existen termistores con configuración *PTC*, cuya resistencia incrementa cuando temperatura incrementa. Por ahora el enfoque se hará en el termistor *NTC*, el cual es usado para aplicación de sensor *EGR*.

El termistor *NTC* produce un gran cambio de resistencia por cada cambio de grado en temperatura. A continuación, se muestra la ecuación para cálculo de temperatura descrita por Steinhart-Hart. La ecuación contiene la relación entre temperatura y resistencia:

$$T [^{\circ}\text{C}] = (1 / (a + b (\ln R) + c (\ln R)^2 + d (\ln R)^3)) - 273.15 \quad (1)$$

Donde:

- Coeficientes *a*, *b*, *c* y *d* son proporcionados por el fabricante del termistor. Son específicos de acuerdo con el tipo de termistor y el rango de temperatura definido.
- *T* es la temperatura en grados Celsius [$^{\circ}\text{C}$]
- *R* es resistencia obtenida en *T* [$^{\circ}\text{C}$], y es medida en Ohms [Ω].
- *ln* es un logaritmo natural.

A diferencia de los *RTD*, que cambian la resistencia de un modo casi lineal, los termistores *NTC* presentan un cambio de la resistencia no lineal. Las razones por la que los termistores tienen un mayor uso son:

- Mayor cambio de resistencia por grado de temperatura, lo que proporciona mayor resolución.
- Alto nivel de repetibilidad y estabilidad.

El rango de aplicación de un termistor puede ir desde los -50°C hasta los 300°C . mientras que un *RTD* puede trabajar desde los -200° hasta los 600°C . La Fig. 8 muestra la relación que existe y el comportamiento en un termistor y un *RTD*.

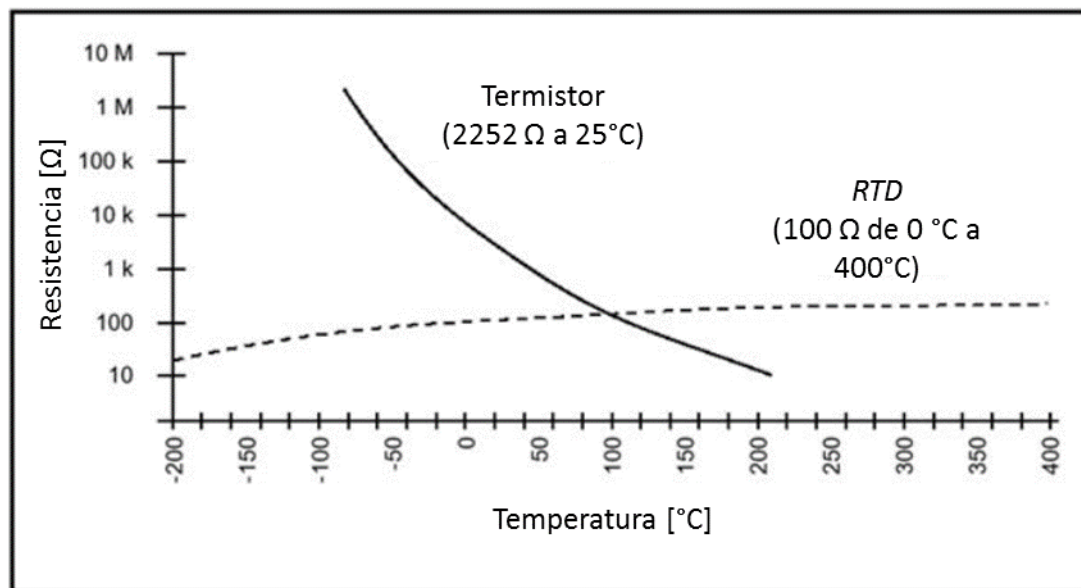


Fig. 8. Relación de resistencia y temperatura con termistor *NTC* y *RTD*⁴.

2.7 PRINCIPIOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN

Debido a que los transductores y la presión son un elemento importante para la medición de fuga en diversos sistemas de medición de fuga, a continuación se muestra la definición de puntos clave para funcionamiento de diferentes tipos de fuga.

⁴ Khemani (2009).

2.7.1 Transductores

Son elementos o dispositivos que convierten un tipo de energía a otro más adecuado para algún sistema, es decir, convierte una magnitud física, no interpretable por el sistema, a otra variable que puede ser interpretada por el sistema. El transductor transforma la señal de entrada en otra normalmente de tipo eléctrico (Fig. 9).

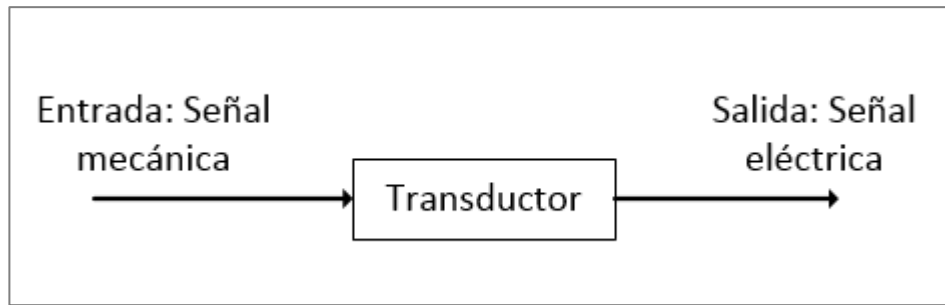


Fig. 9. Esquema de un transductor.

Los transductores tienen diferentes tipos de aplicaciones [7], por ejemplo:

- Posición, proximidad o presencia.
 - Finales de carrera mecánicos (posición).
 - Detectores de proximidad:
- Desplazamiento o movimiento.
 - Medidas a grandes y cortas distancias.
 - Medidores de ángulos.
- Velocidad.
 - Tacómetros.
 - Ópticos.
- Presión.
- Temperatura.
 - Termo-resistencias.
 - Termistores.
 - Pirómetros de radiación.
- Luz.
 - Fotorresistencias.
 - Fotodiodos.
 - Fototransistores.

La operación del sistema caída de presión se centra en el uso de transductores de presión. Pero antes de explicar más a detalle el funcionamiento de un transductor de presión se explicará brevemente en que consisten los términos "presión" y "elementos de presión".

a) Presión

Unidad de presión es el Pascal (Pa), la cual es una fuerza de 1 Newton (N) actuando en un área de un metro cuadrado (m²). Unidades comúnmente usadas para medir presión son kilo pascal (kPa) y el megapascal (MPa). Otra unidad común de medida es el psi:

$$1 \text{ psi} = 6890.16 \text{ pascal} = 6.89016 \text{ kPa}$$

$$1000 \text{ psi} = 6890.16 \text{ kPa} = 6.89016 \text{ MPa}$$

La presión se define como la fuerza por unidad de área:

$$P = F/A \quad (2)$$

b) Elementos de presión

Los elementos de presión realizan la función de convertir presión en un movimiento mecánico. Están fabricados de manera que al aplicar presión en el dispositivo se obtiene una deformación la cual produce una distorsión que resulta en un movimiento o fuerza. Esta salida o distorsión se utiliza para generar una señal inteligente o lectura que es proporcional a la presión aplicada (Fig. 10).

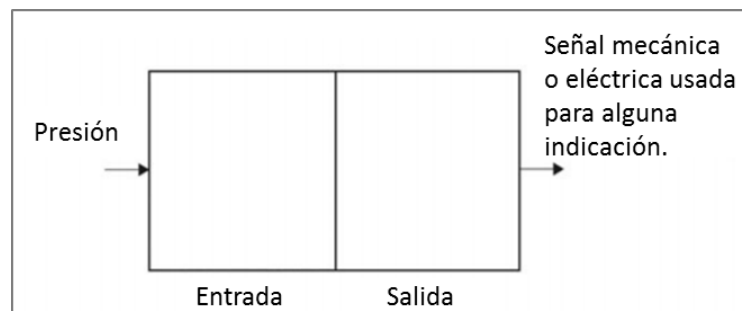


Fig. 10. Diagrama de bloques de un transductor de presión⁵.

⁵ Gillum (2009).

La presión se aplica en la superficie o área del elemento para producir una fuerza que origina una deflexión mecánica. Esta deflexión se utiliza para generar una salida eléctrica o mecánica [8].

2.7.2 Transductores de presión

Los transductores de presión transforman la presión de un medio en señal eléctrica para su posterior análisis. Existen transductores de salida de tensión que incluyen un acondicionamiento de señal integral que proporciona una salida normalmente de 0-5V ó 0-10Vcc. Fig. 11 muestra cómo se acondicionaría un transductor de presión para poder determinar la salida de voltaje en medio de prueba.

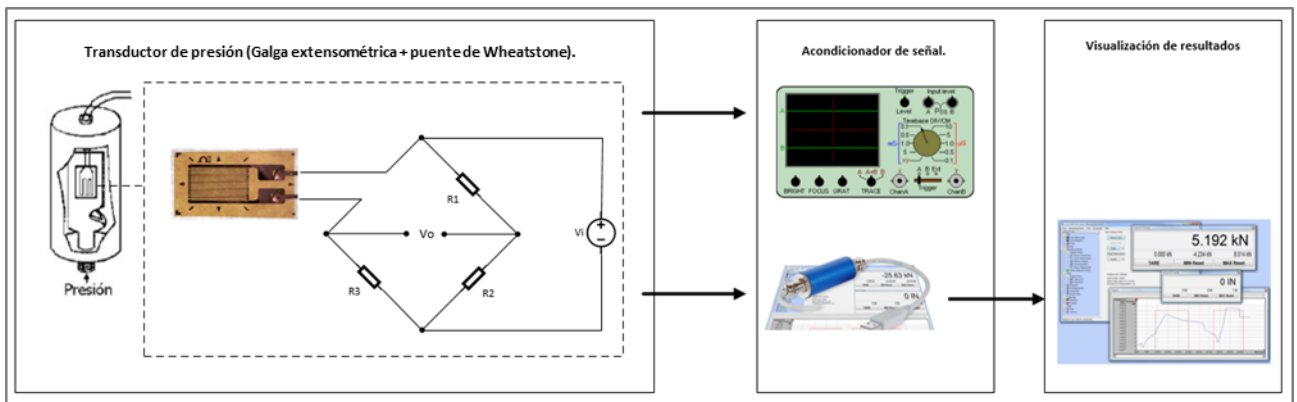


Fig. 11. Configuración de transductor.

La mayoría de los transductores son fabricados insensibles a los cambios de temperatura, seleccionando los materiales apropiados para las expansiones térmicas. De esta manera las lecturas proporcionadas por el transductor son independientes de los cambios térmicos dentro del sistema donde se está monitoreando la presión.

Chattopadhyay *et al.* (2012), demuestran la relación lineal que existe entre presión y salida de voltaje (Fig. 12). Dependiendo del tipo de transductor a utilizar, éste entregará la salida de voltaje según el rango de presión en el que esté calibrado el transductor.

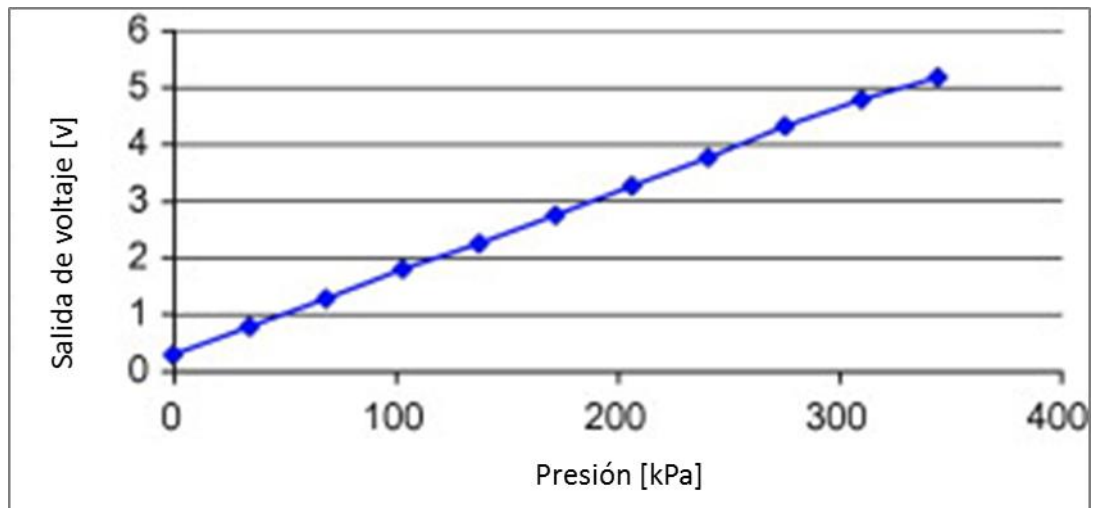


Fig. 12. Salida de voltaje proporcional a presión de transductor. En base a la presión que se encuentra en sistema, transductor leerá esta misma y la convertirá a voltaje⁶.

De este principio de presión y salida de voltaje, se deriva el método de prueba de fuga de caída de presión, el cual depende de un transductor de presión para medición de fuga dentro del sistema. Cualquier caída de presión indica una caída de voltaje, lo cual es un indicador de fuga en el sensor. La señal que detecta el transductor es enviada a un módulo acondicionador de señal.

2.7.3 Transductores de presión relativa y absoluta

Las mediciones de presión pueden ser caracterizadas por ser absolutas o relativas (o *gauge*). Presiones absolutas son las que se encuentra por arriba de 0 psi, cuya medición comienza desde vacío, y relativas comienzan desde presión atmosférica.

- a) Presión absoluta: El método de medición es relativo a 0 psi, está lo más cercano posible al vacío. La presión se mide se toma en consideración la presión atmosférica en adición a la presión de interés. Este tipo de transductor se recomienda para sistemas en los que el sistema se encuentra en vacío.
- b) *Gauge pressure*: Toma como referencia inicialmente la presión atmosférica del ambiente. Se recomienda este tipo de transductor para sistemas en donde la medición será a partir de la presión atmosférica.

⁶ Chattopadhyay *et al.* (2012).

Por lo tanto, los transductores *gauge* se fabrican con base en la presión atmosférica, la cual es una referencia variable. Los transductores de presión absoluta son evacuados de aire y tienen que estar lo más cercano posible al vacío (Fig. 13). Para este tipo de transductores, la presión atmosférica o cambios de altitudes no afecta, siempre y cuando los transductores sean usados en un sistema que esta sellado de la atmósfera.

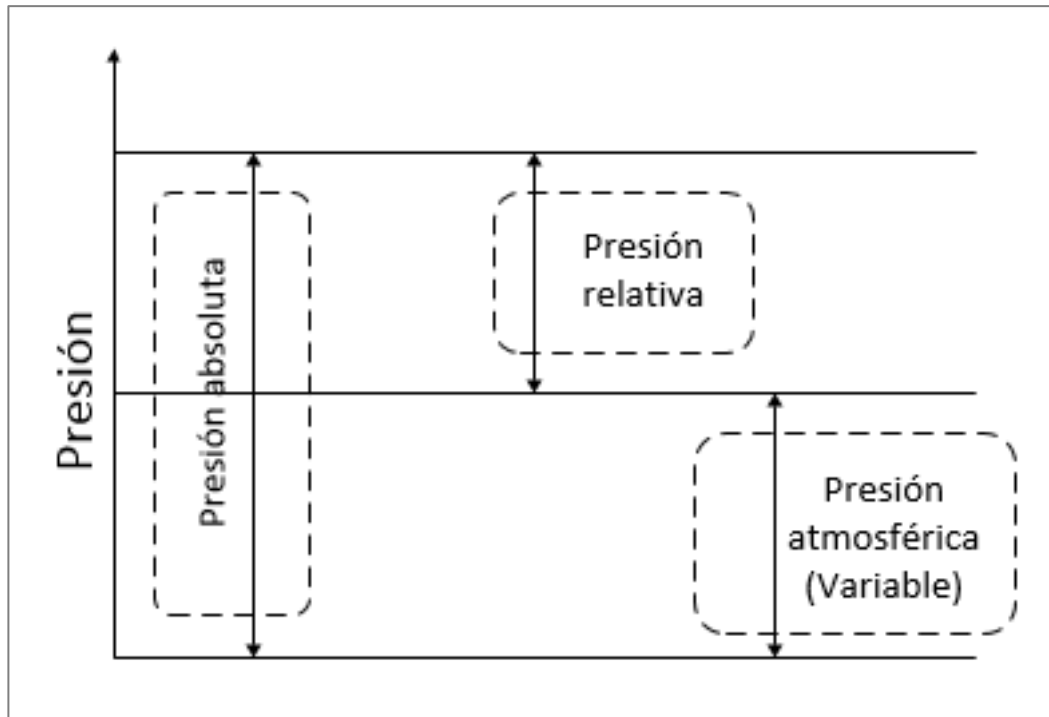


Fig. 13. Presiones a nivel absoluto y relativo.

2.8 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN

2.8.1 Galgas extensométricas

En 1856 Lord Kelvin descubrió que al aplicar una fuerza sobre un hilo conductor o un semiconductor, se presenta una variación en su resistencia eléctrica. Este principio permite realizar mediciones de fuerzas que provoquen pequeñas deformaciones en el conductor. De este principio se deriva la construcción de las galgas extensométricas. Estos dispositivos son transductores activos que requieren de corriente o voltaje para que puedan trabajar. Una vez que se aplican sobre un espécimen, permiten medir la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. De esta manera, fuerzas de compresión, tracción o torsión, aplicadas sobre materiales elásticos, generan

deformaciones que son transmitidas a la galga, respondiendo ésta con una variación de su propia resistencia eléctrica [10].

Idrovo *et al.* (2010) explican el uso o aplicación de las galgas (Fig. 14), las cuales tienen diversas aplicaciones a nivel industrial y en todos los campos donde se requieren mediciones precisas de fuerza. Las galgas se utilizan para la medición electrónica de diferentes magnitudes mecánicas tales como presión, carga, deformación, torque, entre otras. Estas mediciones pueden catalogarse en mixtas, dinámicas y estáticas:

- Estáticas: Referidas a soportes y estructuras resistentes sometidas a cargas que se encuentran fijas, cargas que no están en movimiento.
- Mixtas: Cuando se realizan sobre soportes y estructuras sometidas a la acción de cargas de variación rápida.
- Dinámicas: Realizadas sobre acciones de variación rápida, tales como fenómenos de vibración, impacto, entre otros.



Fig. 14. Galga extensométrica. Su resistencia eléctrica cambia cuando sufre un estiramiento o una compresión⁷.

⁷ Patience (2017).

2.8.2 Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas

Una galga extensométrica es un sensor que mide la deformación, presión, carga y posición. Se basa en el efecto piezorresistivo (Fig. 15), que es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos.

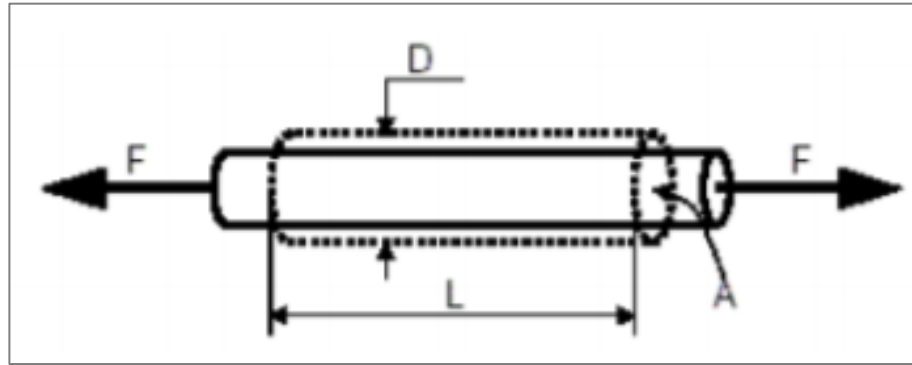


Fig. 15. Efecto piezorresistivo⁸.

Si se considera un hilo metálico de longitud L , sección transversal A y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R es:

$$R = \rho \cdot L/A \quad (3)$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, su resistencia R variara debido a los cambios dimensionales causados en L , A y también ρ .

$$dR = \rho/A \cdot dL - (\rho \cdot L) / (A)^2 \cdot dA + L/A \cdot d\rho \quad (4)$$

$$dR / R = dL/L - dA / A + d\rho / \rho \quad (5)$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional está dado por la ley de Hooke.

$$\sigma = F/A = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

Donde E es módulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young, σ es el esfuerzo uniaxial y ε es la deformación unitaria.

⁸ Idrovo *et al.* (2010).

La Fig. 16 muestra la relación entre esfuerzos y deformación, donde se representa gráficamente la deformación que sufre un material, desde la zona elástica hasta el momento de ruptura.

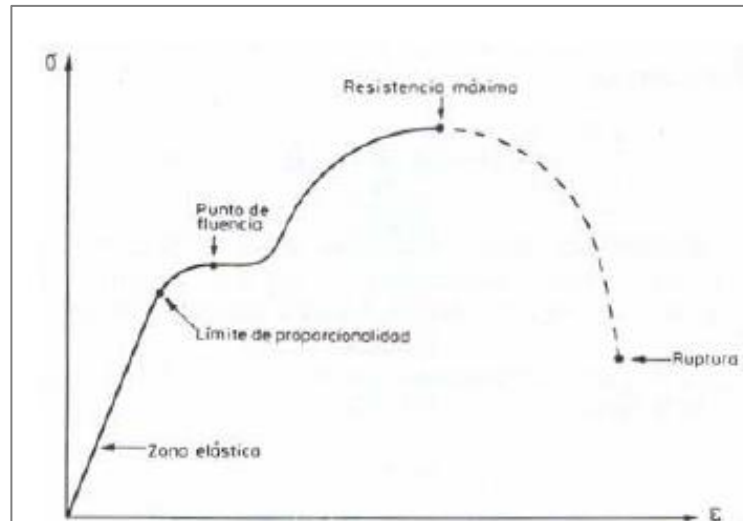


Fig. 16. Relación entre esfuerzos y deformación⁹.

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral contra la axial también es una propiedad del material. Esta propiedad se llama razón de Poisson y se define como:

$$\mu = -(dD/D) / (dL/L) \quad (7)$$

Donde D es el diámetro del hilo y μ es denominado coeficiente de Poisson, cuyo valor esta entre 0 y 0.5. En términos de la razón de Poisson se tiene:

$$dR/R = dL/L [1+2 \cdot \mu] + d\rho/\rho \quad (8)$$

$$(dR/R) / (dL/L) = 1+2 \cdot \mu + (d\rho/\rho) / (dL/L) \quad (9)$$

En donde:

- $2 \cdot \mu \rightarrow$ Cambio en la resistencia debido a un cambio en la sección.
- $(dD/D) / (dL/L) \rightarrow$ Cambio en la resistencia debido al efecto piezorresistivo.

⁹ Idrovo et al. (2010).

Por otro lado, se encuentra el cambio en resistencia de un medidor de deformación que por lo general se expresa en términos de un parámetro determinado por el fabricante empíricamente llamado factor de galga (GF) expresado como:

$$GF = (dR / R) / \epsilon \quad (10)$$

Relacionando la ecuación 9 y ecuación 10, se observa que el factor de galga depende de la razón de Poisson para el material del medidor y su piezorresistividad.

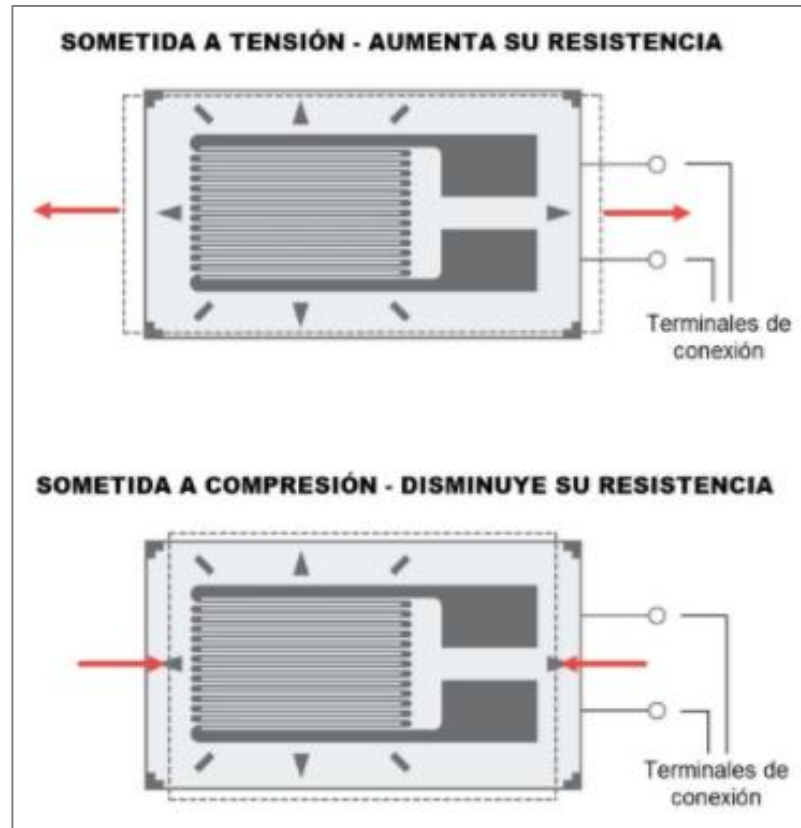


Fig. 17. Efecto de tensión en galga extensométrica. Galga sometida a tensión aumenta su resistencia, y cuando es sometida a compresión disminuye su resistencia¹⁰.

Dependiendo de la tensión o compresión a la que se somete la galga, habrá un cambio de resistencia (Fig. 17).

2.8.3 Campos de aplicación de galgas extensométricas

Su mayor aplicación se encuentra en las industrias de diseño mecánico y estructural donde es necesario el control riguroso de la deformación sufrida. A continuación algunos

¹⁰ Martínez (año desconocido).

ejemplos: Aviones, vagones de tren, puentes, automóviles, edificios, etc. Las galgas Extensométricas son útiles para todas aquellas situaciones en la que es preciso hallar esfuerzos y deformaciones en estructuras que cumplan la ley de Hooke.

Por otro lado, también son utilizadas para sensores de monitoreo y en sistemas de control donde constituyen parte activa de un transductor. Estos transductores equipados con galgas Extensométricas tienen alguno de los siguientes funcionamientos [10]:

- Medición de desplazamiento: Colocando galgas en lugares adecuados se puede relacionar la deformación que sufre la misma con el desplazamiento de un punto específico del elemento.
- Medición de fuerza axial y peso: Es uno de los transductores más utilizados en la industria, su funcionamiento se debe a que se puede relacionar la deformación que sufre la galga con la fuerza y/o el peso que causa dicha deformación.
- Medición de presión: Se pueden medir presiones absolutas o manométricas. Este transductor consta de una cavidad en donde se encuentra colocada una membrana a la que están adheridas adecuadamente las galgas, si existiera una diferencia de presión entre ambos lados de la membrana elástica, ésta se flexionará quedando una deformación en la galga que puede ser medida.

2.8.4 Puente de *Wheatstone*

Con base en lo explicado anteriormente, se resumirá en unos cuantos renglones el significado de una galga extensométrica, para hacer la conexión con funcionamiento de puente de *Wheatstone*, el cual utiliza la medición de las galgas extensométricas, para convertirla en una señal eléctrica.

Una galga extensométrica es un dispositivo que se basa en el efecto piezorresistivo, el cual es una propiedad de algunos materiales, que cambian la resistencia eléctrica cuando se someten a ciertos esfuerzos o se deforman en dirección de los ejes mecánicos. Las galgas se basan en la propiedad física de conductancia eléctrica y depende de la geometría del conductor. Cuando un conductor eléctrico se estira, éste se vuelve más delgado y largo, aumentando su resistencia eléctrica; de manera contraria, cuando un conductor es comprimido, se vuelve más ancho y corto

disminuyendo así su resistencia eléctrica. Midiendo la resistencia eléctrica de la galga se puede entonces calcular el valor de la tensión aplicada.

El punto clave de las galgas extensométricas es medir el cambio de resistencia, el cual indica la deformación que tuvieron las galgas. Este cambio de resistencia es medido a través de un puente de *Wheatstone*.

Un puente de *Wheatstone* (Fig. 18) es un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Éstos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida (R_U).

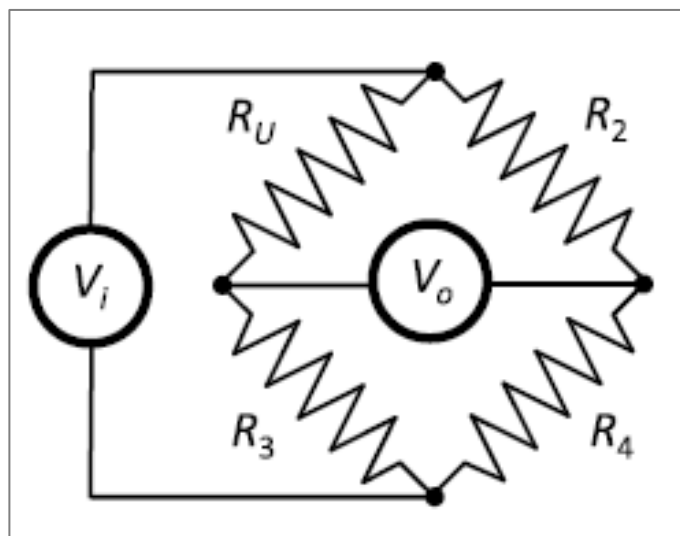


Fig. 18. Diagrama de puente de *Wheatstone*. Voltaje (V_i) se aplica a través de fuente de poder (voltaje). La corriente se distribuye a través de cada resistencia, lo cual entrega una salida de voltaje (V_o)¹¹.

El valor de voltaje del circuito cambia con base en el valor de resistencia R_U (Fig. 18). Las resistencias R_2 , R_3 y R_4 son conocidas y la resistencia R_U varía. Tomando en cuenta que el circuito está conectado con galgas extensométricas, la resistencia R_U va a variar dependiendo de la deflexión o cambio de resistencia que tengan las galgas. Para que el circuito funcione, se aplica voltaje V_i y se mide el voltaje entre las dos terminales de V_o (Fig. 18). La corriente que fluye a través de cada puente y con base en la ley de Ohm es:

$$I_1 = V_i / (R_U + R_3)$$

¹¹ Patience (2011).

Donde I_1 es la corriente que circula a través de R_u y R_3 (11)

y

$$I_2 = V_i / (R_2 + R_4)$$

Donde I_2 es la corriente que circula a través de R_2 y R_4 (12)

La diferencia de voltaje entre las terminales V_o es igual a la diferencia en la caída de voltaje a través de resistencia desconocida R_u y R_2 :

$$V_o = I_1 R_u - I_2 R_2 \quad (13)$$

Sustituyendo ecuación 11 y ecuación 12 en ecuación 13, y expresando la proporción de voltaje como en función de la resistencia, tenemos lo siguiente:

$$V_o/V_i = R_u/(R_u+R_3) - R_2/(R_2+R_4) \quad (14)$$

Despejando V_o en ecuación 14, obtenemos finalmente ecuación final para cálculo de voltaje en base a la variación de resistencia que se presenta en galgas extensométricas debido a un factor externo:

$$V_o = [R_u/(R_u+R_3) - R_2/(R_2+R_4)] \cdot V_i \quad (15)$$

2.9 MÉTODOS DE PRUEBA DE FUGA DE EGR

Unos de los principales problemas que se presentaba en el sensor *EGR* eran lecturas erróneas por fugas. Debido a que internamente el sensor *EGR* no está sellado adecuadamente, los gases, suciedad o líquidos escapan hacia el interior del sensor *EGR* ocasionando que el sensor no mida correctamente el ambiente en el que se encuentra. También puede ocasionar una falla prematura, la cual puede ocasionar falla total del sensor y por lo tanto incorrecto funcionamiento del sistema *EGR*.

Debido al modo de falla de fuga presentado en sensor, en la industria donde se manufactura el sensor se realiza una prueba de fuga para asegurar el correcto funcionamiento del sensor y evitar daño prematuro o falla total.

Una fuga puede ser descrita como un escape de un gas a través de un recinto. Bien lo mencionan Bergoglio *et al.* (2011), existen diferentes causas de una fuga: defectos de material, área de sellado, porosidad del material, fibras. Fallas por fibras, y daño en área de sellado, son los grupos comunes de principales fuentes de fuga en el sensor *EGR*.

Las fugas pueden ser encontradas mediante el uso de diferentes tipos de sistemas, por lo cual es importante definir el principal modo de falla que origina la fuga para en base a ello determinar el sistema de prueba de fuga que más se adecue a la necesidad del producto. Por ejemplo, fugas debido a porosidad son detectadas con facilidad en sistema de presión, fugas virtuales son más comunes en sistemas de vacío [15].

Para seleccionar el tipo de prueba de fuga es necesario tener en consideración los límites de fuga permitidos en el dispositivo, costo y confiabilidad del tipo de sistema. Bergoglio *et al.* (2011) señalan que las fugas con un nivel de 10^{-2} atm.cc/s pueden ser detectadas con oídos, fugas en un rango de 10^{-5} atm.cc/s pueden ser detectadas con los ojos y las pequeñas fugas menores a 10^{-5} atm.cc/s ya requieren de un método sofisticado en detección y medición.

En términos de unidades, el nivel de fuga se puede definir de diferentes maneras. Si el SI se utiliza, entonces se debe de expresar en $\text{mbar} \cdot \text{L/s}$. Relación entre atm.cc/s y mbar L/s es la siguiente:

$$1 \text{ atm.cc/s} = 1013 \text{ mbar} \cdot 0.001 \text{ L/s} = 1.013 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$$

$1 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ es la cantidad de gas necesaria que se tiene que remover de un contenedor de 1 litro en un Segundo para reducir la presión a 1mbar. De manera más general, el flujo de gas producido por una fuga en un contenedor puede ser definido de la siguiente manera:

$$Q = V * (\Delta p / \Delta t) \quad (16)$$

Donde Δp es la diferencia entre la presión interna y externa, Δt es el tiempo, y V es el volumen del contenedor o pieza a probar [16].

Existe todo un grupo de métodos de prueba para la evaluación de fugas en dispositivos. Para que ocurra una fuga, hay varios factores en juego al mismo tiempo, éstos son el tamaño del agujero o canal, tipo de dispositivo a probar, tipo de material que se está probando. El nivel de fuga está determinado por el nivel del agujero o canal. Dependiendo de la aplicación, se debe de seleccionar el método de fuga que más se adecue a los niveles de detección deseados en el dispositivo.

En la Fig. 19 se muestran diferentes tipos de fuga recomendados, dependiendo del tipo de dispositivo a probar. Debido a que el sensor EGR cuenta con múltiple sellado y sensor se sella en medio ambiente (aire queda atrapado internamente), se recomienda investigar los siguientes métodos de prueba de fuga: Espectrómetro de masa, Medición de presión (Caída de presión o sistema de vacío), prueba de burbujas.

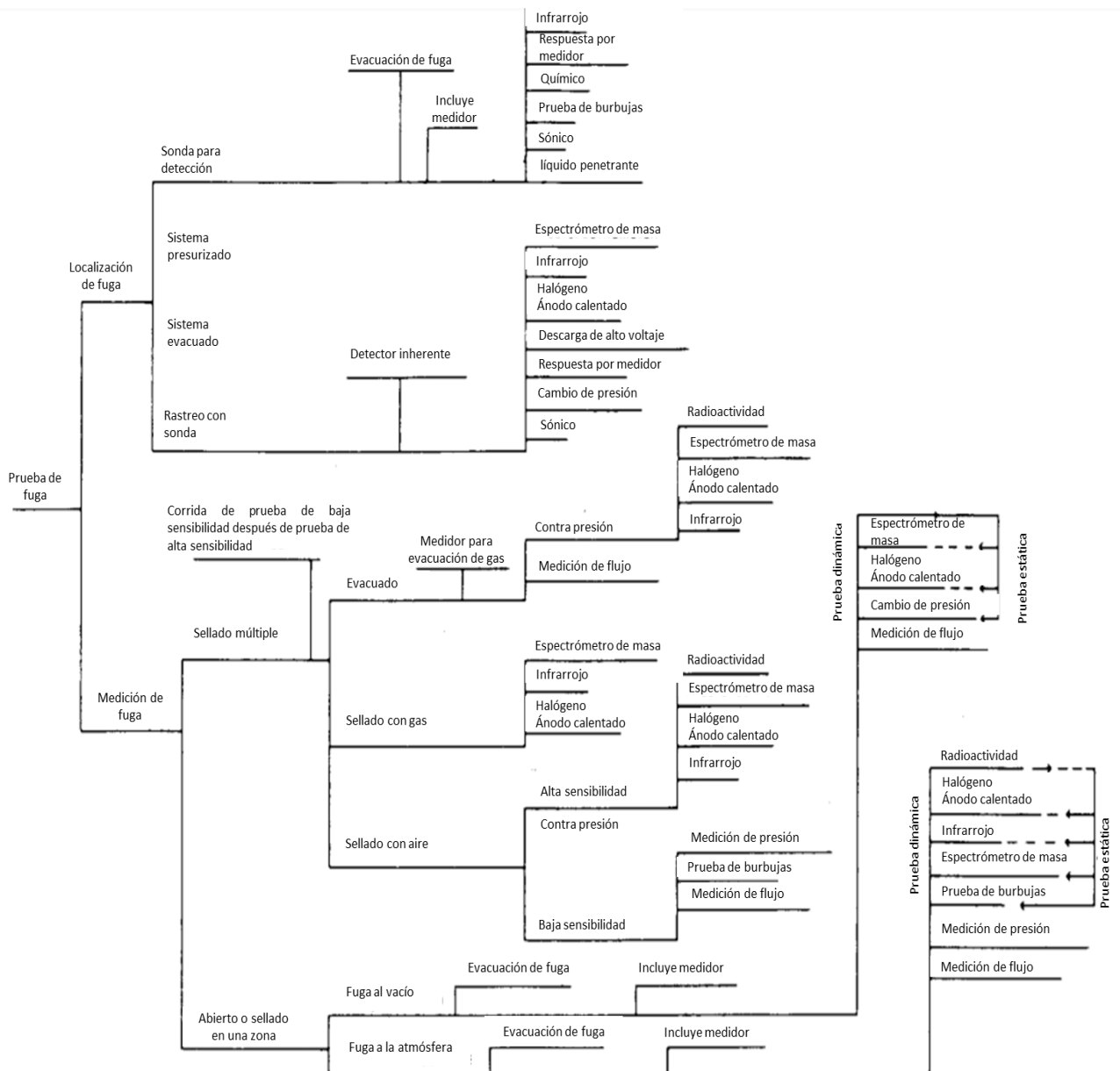


Fig. 19. Guía para selección de prueba de fuga¹².

¹² Jackson *et al.* (1998).

2.9.1 Prueba de fuga con espectrómetro de masa.

El principio del EM, según indica Bergoglio *et al.* (2011), consiste en separar los iones de helio del resto de los iones compuestos por nitrógeno, oxígeno. Estos iones que fueron separados viajan a través del colector y comienzan a generar una carga. El plato colector está conectado a un módulo amplificador de alta ganancia. La señal del amplificador es proporcional al tamaño de fuga en el sensor. El equipo es capaz de detectar niveles de fuga por arriba de $10^{-5} \text{ atm.cc /s}$ [12].

En 1910 Thomson y su asistente Francis Aston, desarrollaron el primer EM en el cual los iones fueron separados en diferentes trayectorias parabólicas por campos electromagnéticos. Los iones podían ser detectados en pantallas fluorescentes. De esta manera los pesos moleculares podían ser medidos con alta precisión [15].

La Fig. 20 muestra el principio de funcionamiento de un EM, donde el principal objetivo es separar los iones de helio, para determinar el nivel de fuga en dispositivo de prueba.

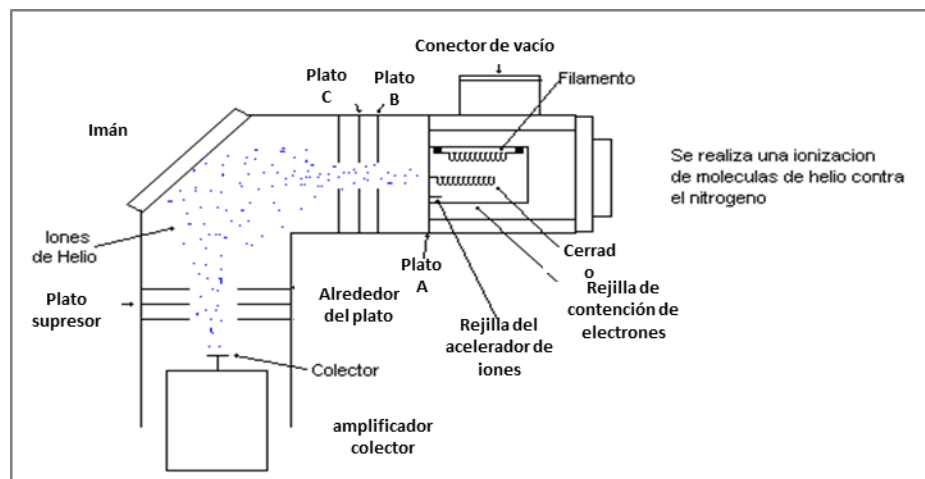


Fig. 20. Espectrómetro de masas. Es una técnica de análisis que permite determinar la distribución de las moléculas de una sustancia en función de su masa (Falkner *et al.*, 2007). Espectrómetro de masa es útil para caracterizar átomos o moléculas¹³.

El tiempo de ciclo de este modo de prueba depende en la velocidad de flujo del gas. Una prueba de fuga realizada mediante el uso de nitrógeno y helio muestra la gran diferencia en detección de piezas defectuosas, es claro como el tiempo ciclo y el tipo de gas a utilizar difiere de gran manera en la prueba a realizar. El tamaño molecular del

¹³ Sensata Technologies (2012).

helio permite que se detecten con facilidad fugas debido a que pasan con mayor facilidad a través de pequeños poros, lo cual hace que sea un buen agente para detección de fugas.

El método de prueba muestra ser efectivo, pero esto siempre y cuando se haga la prueba mediante el uso del gas de Helio. Bien lo señalan Kossina *et al.* (2010), las pruebas de fugas de helio resultan ser ideales para una mejor detección.

Muchas industrias manufactureras utilizan el EM para detección de fuga debido a su alta sensibilidad de detección. La gran limitación de este tipo de prueba es el alto costo de mantenimiento.

Todos los equipos que utilizan la tecnología de EM deben de ser calibrados frecuentemente para asegurar la correcta sensibilidad y medición de fuga. Otra de las experiencias que se tienen con este tipo de sistemas es que debido a la alta sensibilidad que tienen para detección de fugas, el equipo puede llegar a sobrecargarse lo cual puede originar que requiera de constantes calibraciones y el sistema pueda tener daño prematuro.

2.9.2 Prueba de burbujas

Se considera un método no técnico que no requiere del uso de ningún aparato, dispositivo, y depende totalmente de los sentidos naturales: Oído y vista. Es un método de prueba de fácil aplicación, que es muy útil para detectar fugas gruesas por arriba de 10^{-3} atm.cc/s .

Con el método de burbujas, la prueba consiste en introducir dispositivo en una tina con líquido de fluorocarbono (detector de burbujas) que tiene que estar hirviendo de un rango de temperatura de 95°C a 130°C. El dispositivo por probar tiene que estar dentro de la tina, al menos 30 segundos. Posteriormente se debe de verificar si no se generan burbujas en el ambiente de prueba. Una o más burbujas conlleva a rechazar el producto. Esta prueba es totalmente dependiente del criterio de operador, y puede producir cansancio después de horas de trabajo e inspección visual. Debido a la fatiga por constante inspección visual, se podría ocasionar que se clasifiquen piezas malas como buenas. Este tipo de prueba es totalmente cualitativo. Por el alto costo de

mantenimiento y el tipo de prueba, se recomienda usar este tipo de prueba para detección de fugas gruesas y fáciles de visualizar por el sistema.

La Fig. 21 muestra el esquemático de prueba de fuga con burbujas con fluorocarbono, donde se sumergen 4 piezas de prueba, y se espera cierto determinado tiempo para detección de burbujas en caso de que el dispositivo presente fuga interna.

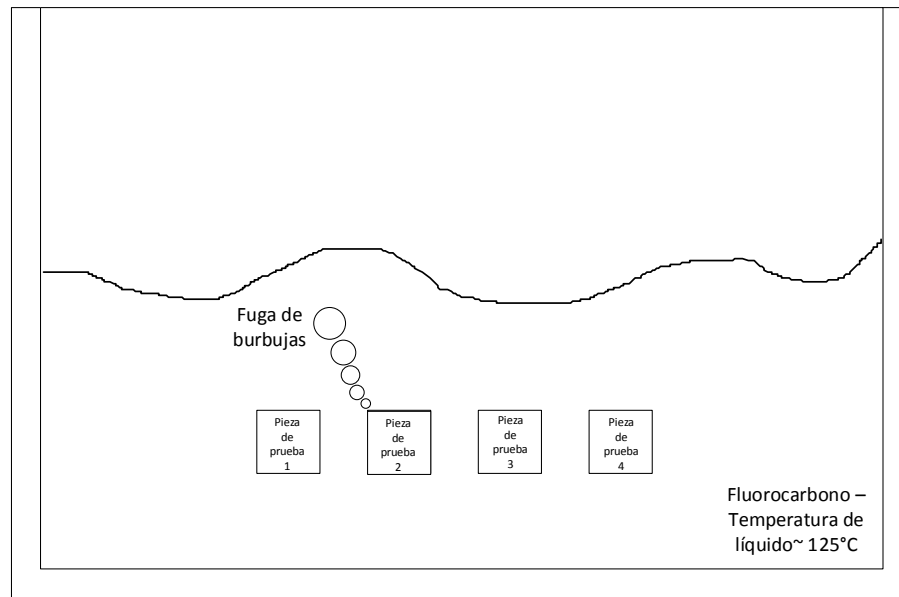


Fig. 21. Prueba de burbujas con fluorocarbono.

2.9.3 Medición ultrasónica

Cualquier tipo de fuga que se encuentre en algún dispositivo, emitirá un sonido, el cual dependiendo de nivel de fuga, puede generar una frecuencia baja o alta. Fugas pequeñas, emiten un sonido con una frecuencia la cual es alta para nuestros oídos de detectar. Para estos casos, se utiliza un detector de fuga ultrasónico. Los detectores de fuga ultrasónica son generalmente dispositivos que se utilizan con audífonos, un medidor, una boquilla y algún software. Sistemas más complejos, pueden ser utilizados cuando es necesario automatizar el proceso en un ambiente de producción por ejemplo. Este método no es de confianza cuando los sonidos pueden ser producidos por múltiples fugas u otras fuentes del sistema o área donde se realiza la prueba (ruido de fondo o área de trabajo). Por otro lado, el nivel de fuga no se puede medir, solo se puede estimar en base a la frecuencia que emite el sonido de fuga. La sensibilidad del instrumento de

medición es baja, puesto que solo puede detectar fugas arriba de $10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$. por estas razones, este método es apto y recomendado, para cuando se requiere encontrar, únicamente, grandes fugas [20].

2.9.4 Sistema de vacío

Este sistema incluye una cámara de vacío, conectada con un suministro de helio y un detector de fuga de helio (Fig. 22). El componente por probar se posiciona dentro de una cámara. Posteriormente la cámara se cierra y se evacua. El componente también se evacua. Posteriormente se suministra helio al componente. Cualquier fuga permitiría que el helio escapara a través de las paredes de los componentes a la cámara. Como la cámara está conectada directamente a un detector de fugas de helio, cualquier fuga posible se detecta e indica rápidamente. Este método se caracteriza por un nivel muy alto de sensibilidad (hasta $10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$). Resultados de este método son cuantificables y confiables, incluso se puede llegar a optimizar. Por lo cual no requeriría de un ningún juicio del operador. La desventaja es que este método es muy costoso y probablemente el tiempo ciclo sea alto por el manejo de material [20].

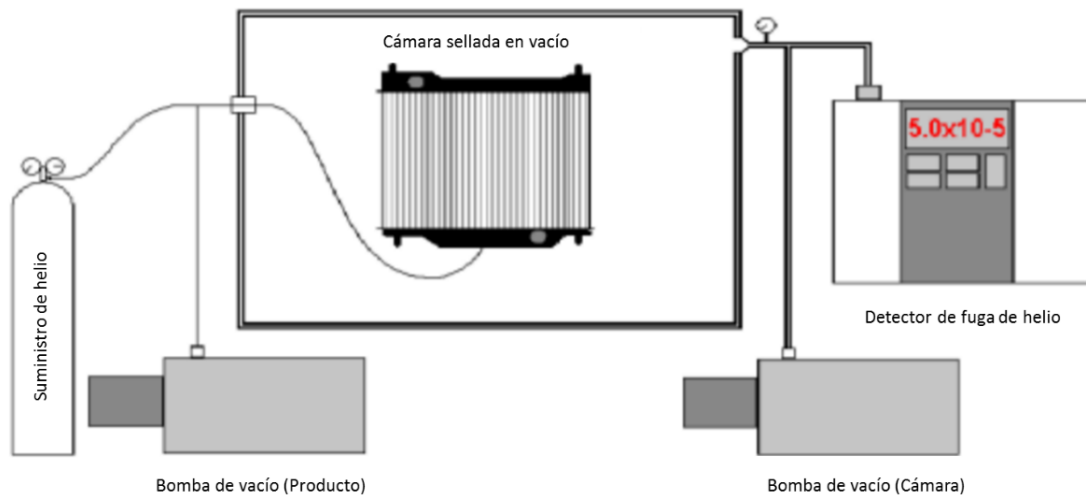


Fig. 22. Sistema de vacío conectado a detector de fuga de helio¹⁴.

¹⁴ Vacuum Engineering (Año desconocido).

2.9.5 Caída de presión

La detección de fuga mediante método de caída de presión es un método en donde el componente es presurizado con algún gas (aire, helio, nitrógeno, etc.) y el transductor monitorea los cambios de presión dentro del sistema. En la Fig. 23 se muestra el diagrama del sistema. Primero se suministra helio y con un regulador de presión se ajusta la presión que se desea aplicar dentro del sistema. Posteriormente se abre una válvula de paso para que fluya la presión dentro del sistema [21]. Una vez que se suministra presión se cierra la válvula de paso y la presión queda encapsulada. En este punto el transductor de presión monitorea constantemente la presión dentro del sistema y evalúa si no hay caídas de presión. Si llegase a caer la presión, es un indicio de que hay fuga en el dispositivo de prueba.

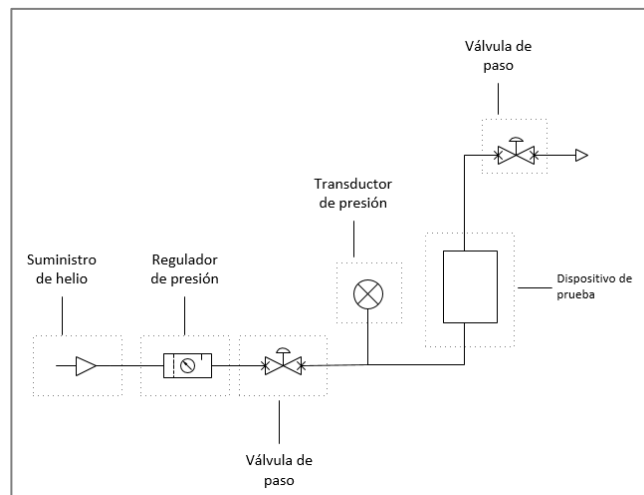


Fig. 23. Diagrama de método "caída de presión".

El método más común para medir la caída de presión con este tipo de sistema es mediante un transductor de presión. En combinación con un amplificador, se puede determinar la fuga en el dispositivo de prueba.

La conversión de la presión en señal eléctrica se consigue mediante la deformación física de las galgas extensométricas que están unidas al diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de *Wheatstone*. La presión aplicada al sensor produce una deflexión del diafragma, que introduce la deformación a los medidores. La deformación producirá un cambio en la señal eléctrica proporcional a la presión.

Por otro lado, para este método es importante tomar en cuenta y definir cuál será la presión de prueba, el dispositivo de medición, el tipo de gas para la prueba y el tiempo de durabilidad de la prueba, para poder de esta manera garantizar una correcta detección de potenciales fugas en los dispositivos de prueba.

2.10 PRUEBA DE FUGA CON DIFERENTES PRESIONES Y GASES

En temas anteriores se explicó los temas relevantes referentes a métodos de prueba de fuga, de los cuales muchos de ellos dependen de la presión y tipo de gas a utilizar. Por lo cual se es importante entender nivel de presión que se debe de aplicar al producto y la influencia que diferentes tipos de gases pueden generar durante la prueba de fuga.

2.10.1 Nivel de fuga a diferentes presiones

Meng *et al.* (2011) demuestran en un experimento la diferencia en detección de fuga con el incremento de presión (Fig. 24). Cualquier tipo de fuga puede ser detectada con mayor facilidad a altas presiones, claro que también es importante realizar estudios para evaluar el punto de presión óptimo para el dispositivo que se probará.

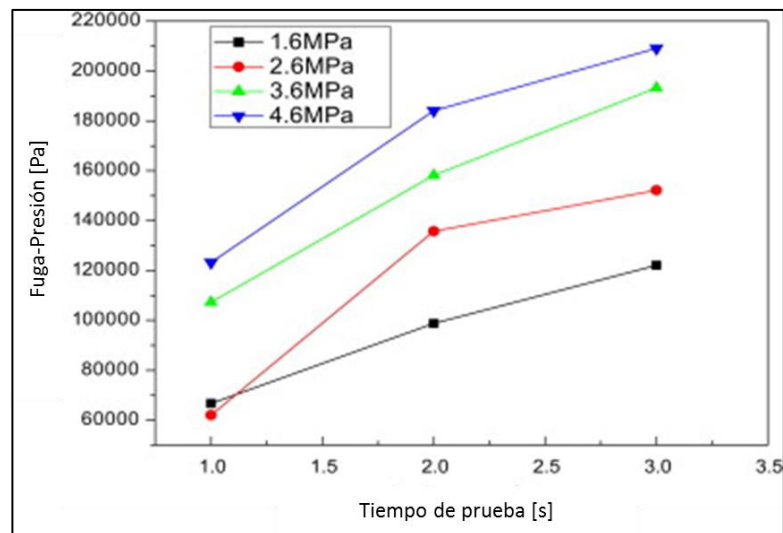


Fig. 24. Nivel de fuga a diferentes presiones. La fuga en el sensor está influenciada por la presión a la que se somete el dispositivo. A mayor presión, será más fácil estimular fallas internas de sellado en sensor¹⁵.

¹⁵ Meng *et al.* (2011).

2.10.2 Nivel de fuga con diferentes gases

Los niveles de fuga para diferentes gases a través del mismo canal o punto de fuga son diferentes debido a la variación de la masa y tamaño del gas. La relación en nivel de fuga entre un gas y otro, a la misma temperatura es [23]:

$$L_1 = L_2 \sqrt{(M_2/M_1)} \quad (17)$$

Donde:

- L_1 = Nivel de fuga de gas 1.
- L_2 = Nivel de fuga de gas 2.
- M_1 = Peso molecular de gas 1.
- M_2 = Peso molecular de gas 2.

Por ejemplo:

$$L_{\text{Nitrogen}} = L_{\text{helium}} \sqrt{M_{\text{helium}} / M_{\text{nitrogen}}} = L_{\text{helium}} \sqrt{4/28} = (0.378) L_{\text{helium}} \quad (18)$$

La Tabla 2 muestra la conversión y relación entre diferentes tipos de gases. Para convertir el nivel de fuga de un gas en la columna izquierda a nivel de un gas en la columna horizontal, se multiplica el valor de la columna por el valor en donde interceptan ambos gases en la Tabla 2.

	L_{He}	L_{N_2}	L_{O_2}	L_{Ar}	$L_{\text{H}_2\text{O}}$	L_{CO_2}
L_{He}	—	0.378	0.354	0.316	0.471	0.301
L_{N_2}	2.646	—	0.935	0.837	1.247	0.798
L_{O_2}	2.828	1.069	—	0.894	1.333	0.853
L_{Ar}	3.162	1.195	1.118	—	1.491	0.953
$L_{\text{H}_2\text{O}}$	2.121	0.802	0.750	0.671	—	0.640
L_{CO_2}	3.317	1.254	1.173	1.049	1.563	—

Tabla 2. Conversión de niveles de fuga a diferentes gases¹⁶.

Por ejemplo:

- Si $L_{\text{He}} = 2 \times 10^{-7} \text{ atm-cc/s}$ de helio.
 - Entonces $L_{\text{O}_2} = (2 \times 10^{-7}) (0.354) = 7.08 \times 10^{-8} \text{ atm-cc/s}$ de oxígeno.
- Si $L_{\text{He}} = 1.1 \times 10^{-5} \text{ atm-cc/s}$ de helio.

¹⁶ Greenhouse (2011).

- o Entonces $N_2 = (1.1 \times 10^{-5}) (0.378) = 7.22 \times 10^{-6} \text{ atm-cc/s}$ de Nitrógeno.

Nota: Masa molecular se puede encontrar en Tabla 3.

Gas	Símbolo	Masa molecular [gr/mol]
Neón	Ne	20
Xenón	Xe	131
Hidrogeno	H	1
Argón	Ar	40
Oxigeno	O2	16
Nitrógeno	N2	14
Radón	Rn	222
Helio	He	4
Aire		29

Tabla 3. Masa molecular de diferentes tipos de gases¹⁷.

Dependiendo del nivel de fuga que se busca detectar, se recomienda analizar el tipo de gas a utilizar en la detección de fugas. Estudios realizados demuestran que el helio puede detectar de mejor manera fugas pequeñas causadas por daños pequeños o puntos pequeños de fuga que a largo plazo pudiesen ocasionar potenciales modos de falla en la aplicación de dispositivo.

Debido a masa molecular del helio (Tabla 3), y con base en la relación de un gas a otro explicado anteriormente, se ha demostrado que el helio es el gas noble que posee mayor facilidad de adaptarse a diversos tipos de prueba de fuga para tener el nivel de detección deseado.

2.11 INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE: PRUEBA DE FUGA ÓPTIMA

En base a los métodos de fuga que se investigaron, se determinó cual es la prueba de fuga que cumple con los objetivos establecidos para la investigación, que son: Costo de fabricación, método de prueba automático, método eco-eficiente, bajo tiempo de ciclo, bajo costo de mantenimiento y nivel de detección de fuga sea suficiente para detectar los modos de falla que impactan a cliente.

¹⁷ Anónimo (año desconocido).

Se evaluaron todos los métodos mediante una matriz (Tabla 4), para determinar que método de prueba de fuga se adecua más a objetivos de la investigación. Mediante el uso de la matriz, se identificó y dio puntaje a cada método, en base a las características que tiene cada uno. El método de puntaje es el siguiente:

- Costo de fabricación: Alto (0 pts.) - Bajo (2 pts.).
- Método de detección Automático: Si (2 pts.) – No (0 pts.).
- Método eco-eficiente: Si (2 pts.) – No (0 pts.).
- Tiempo de ciclo de prueba: Alto (0 pts.) – Medio (1 pt.) - Bajo (2 pts.).
 - *Se puede optimizar en base a Presión aplicada – Tiempo de Prueba – Gas de prueba.
- Nivel de detección de fuga (Se arroja puntaje de mejor a peor): 1° (5 pts.) – 2° (4 pts.) – 3° (3 pts.) – 4° (2 pts.) – 5° (1 pt.).

Método	Costo de fabricación	Método de detección automático	Eco-Eficiente	Tiempo ciclo de prueba	Costo de mantenimiento	Nivel de detección	Puntaje total
Caída de Presión	Bajo (2 pts.)	Si (2 pts.)	Si (2 pts.)	Medio (1 pts.) *	Bajo (2 pts.)	3 (3 pts.)	12
Espectrómetro de Masa	Alto (0 pts.)	Si (2 pts.)	Si (2 pts.)	Bajo (2 pts.)	Alto (0 pts.)	1 (5 pts.)	11
Prueba de burbujas	Bajo (2 pts.)	No (0 pts.)	No (0 pts.)	Alto (0 pts.)	Bajo (2 pts.)	4 (2 pts.)	6
Sistema de vacío	Alto (2 pts.)	Si (2 pts.)	Si (2 pts.)	Medio (1 pts.) *	Alto (0 pts.)	2 (4 pts.)	11
Medición ultrasónica	Bajo (2 pts.)	Si (2 pts.)	Si (2 pts.)	Medio (1 pts.) *	Bajo (2 pts.)	5 (1 pts.)	10

Tabla 4. Matriz para selección de método para prueba de fuga.

En base al puntaje total obtenido en referencia a los objetivos planteados, se determinó que el método que más se adecua a prueba de fuga de sensor EGR, es: Caída de Presión.

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

3.1- PRUEBA DE FUGA CON MÉTODO: CAÍDA DE PRESIÓN

Con base en la investigación realizada, se determinó que el método más eficaz para realizar la prueba de fuga al sensor *EGR* es mediante el método caída de presión, debido a que el método de caída de presión cumple con los requerimientos establecidos para la implementación de la investigación.

Por lo tanto, se diseñó un sistema de caída de presión para realizar la prueba de fuga en el sensor *EGR* y comenzar a realizar las pruebas en cuanto a nivel de eficacia para la detección de fuga en el sensor *EGR*.

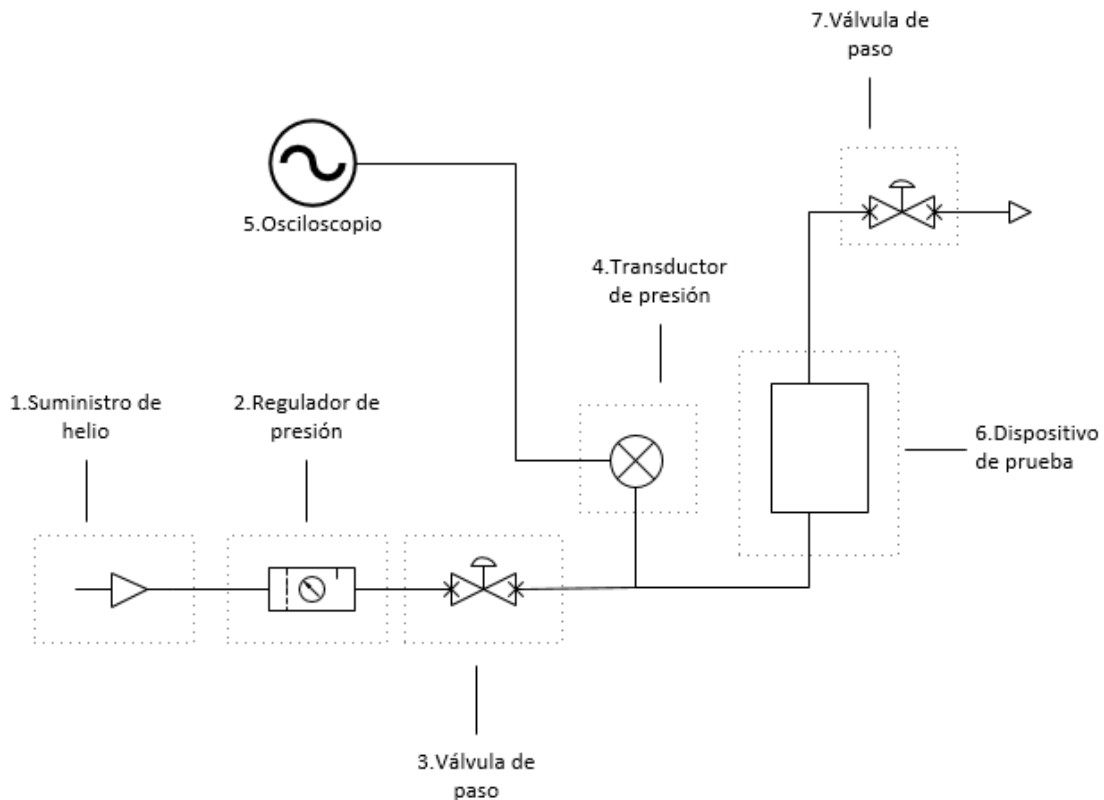


Fig. 25. Sistema de caída de presión.

Se montó un sistema que prácticamente está simulando el método de caída de presión. En la Fig. 25 se muestra el diagrama del sistema el cual consiste en lo siguiente:

1. Suministro de algún tipo de gas (regularmente helio): Tanque de gas localizado en la entrada del sistema.

2. Regulador de presión: Con el regulador se determinó la cantidad de presión que se desea aplicar.
3. Válvula de paso: Permite el flujo del gas dentro del sistema.
4. Transductor de presión: Se montó un transductor para medir el voltaje dentro del sistema (con base en la presión suministrada).
5. Osciloscopio: La señal del transductor se mandó al osciloscopio para amplificar la señal y evaluar la caída de voltaje / presión.
6. Dispositivo de prueba: Se montó el sensor *EGR* en un *fixture*. Toda presión dentro del sistema llega a este punto. Si existiera una fuga, escaparía por el sensor *EGR*, lo cual indicaría que hay una fuga en sensor.
7. Válvula de paso: Utilizada para permitir extraer el gas dentro del sistema aplicado anteriormente.

El sistema consistió en administrar presión con algún gas por determinado tiempo. Mediante un regulador de presión se ajustó la presión del sistema, posteriormente una vez que la presión alcanzó el punto deseado se cerró la válvula de paso para dejar encapsulada la presión dentro del sistema. Una vez que quedó encapsulada, un transductor de presión monitoreo constantemente la caída de voltaje dentro del sistema. Dentro del sistema se encuentra un *fixture* con sensor *EGR*, para evaluar si no hay fuga dentro del sistema o sensor *EGR*.

Con el transductor se midió cuanta presión hay dentro del sistema y se convirtió en voltaje. Esta señal se envió a un osciloscopio para amplificar la señal y evaluar la caída de voltaje. De esta manera se determinó la caída de voltaje que tiene el sensor *EGR*.

El rango de presión del sensor *EGR* en su aplicación es de alrededor de 200 PSI, por lo cual el sensor se sometió al mismo rango para simular la aplicación del sensor.

Debido a que el sistema se encuentra a presión atmosférica, se utilizó un transductor *gauge* para monitorear las lecturas a partir de la presión atmosférica y tener lecturas lo más reales posibles.

3.2- CONVERSIÓN DE VOLTAJE A PRESIÓN PARA MEDICIÓN DE FUGA

Por la aplicación de la presión al sensor (no más de 200 Psi), se utilizó un transductor *gauge* calibrado para soportar un máximo de 200 psi, el cual entrega un voltaje ~0-5 v. La salida de voltaje varía dependiendo de la presión aplicada.

Posteriormente, una vez que se definió el rango de transductor a utilizar, ahora se definió la fórmula con la que se determinó la presión final en la que se encuentra el sistema para calcular el delta de presión final e inicial. Mediante la fórmula de presión final, se determinó cuanta presión perdió el sistema. Es importante recalcar que el valor final que entrega el transductor es voltaje, por lo cual es importante convertir voltaje final a presión final, para después calcular el delta entre presión inicial y final para calcular pérdida de presión.

Para el cálculo de presión final, se utilizó la ecuación:

$$\left. \begin{array}{l} a \longrightarrow b \\ c \longrightarrow x \end{array} \right\} x = (b * c) / a \quad (19)$$

Donde:

- a = Voltaje entregado a 200 psi = 5 volts.
- b = Presión inicial = 200 psi.
- c = Voltaje final = Voltaje al momento que termina la prueba de fuga.
- x = Presión final = (b * c) / a.
 - Voltaje final se convierte en presión final con ecuación (19).

Una vez que se definió la presión final del sistema después de cierto tiempo de prueba definida por el usuario, ahora se procedió a calcular la pérdida de presión dentro del sistema:

$$\text{Pérdida de presión} = \Delta P = \text{Presión final} - \text{Presión inicial.} \quad (20)$$

De esta manera se calculó el nivel de fuga (pérdida de presión) en el sensor *EGR*, con la ecuación 20.

3.3- PRUEBA DE FUGA CON HELIO, NITRÓGENO Y AIRE.

Con base en las investigaciones realizadas anteriormente, se definió que el helio es el gas con menor peso molecular y el cual puede escapar más fácil por puntos pequeños de fuga, lo cual ayuda a que se pueda detectar con mayor facilidad potenciales fugas en sensor.

Para confirmar la teoría, se generaron diferentes sensores *EGR* con todos los posibles modos de falla debido a fuga y se probaron en el sistema de caída de presión, con aire, nitrógeno y helio. Se procesaron grupos de la siguiente manera:

1. Grupo 1: Sensores con sello interno dañado (Fig. 26).
 - a. Se procesó sensor con sistema caída de presión con aire.
 - b. Se procesó sensor con sistema caída de presión con Nitrógeno.
 - c. Se procesó sensor con sistema caída de presión con Helio.

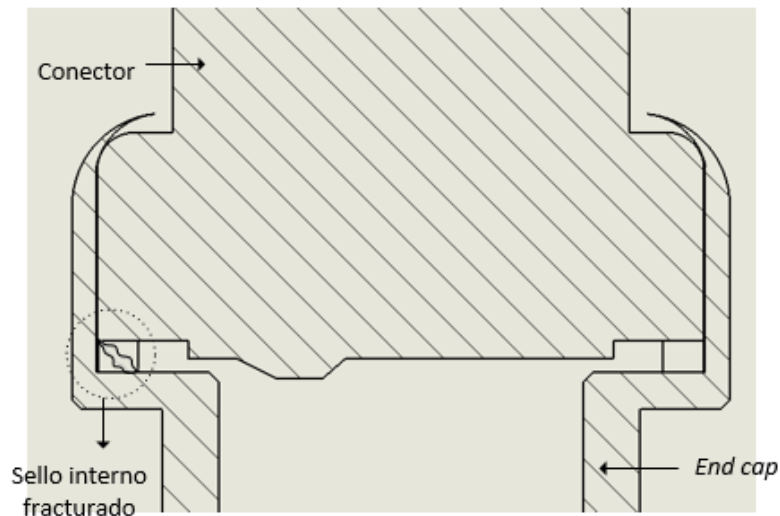


Fig. 26. Sensor *EGR* con sello interno dañado.

2. Grupo 2: Piezas con fibra en sello (Fig. 27).

- a. Se procesó sensor con sistema caída de presión con aire.
- b. Se procesó sensor con sistema caída de presión con Nitrógeno.
- c. Se procesó sensor con sistema caída de presión con Helio.

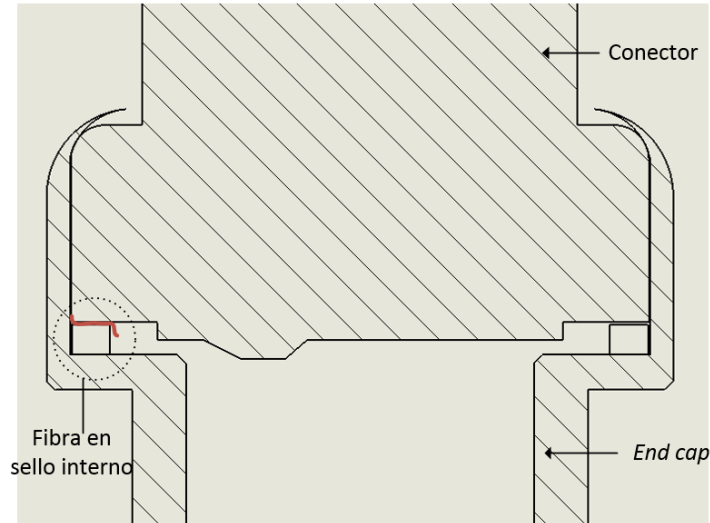


Fig. 27. Sensor EGR con fibra en sello interno.

3. Grupo 3: Piezas sin sello (Fig. 28).

- a. Se procesó sensor con sistema caída de presión con aire.
- b. Se procesó sensor con sistema caída de presión con Nitrógeno.
- c. Se procesó sensor con sistema caída de presión con Helio.

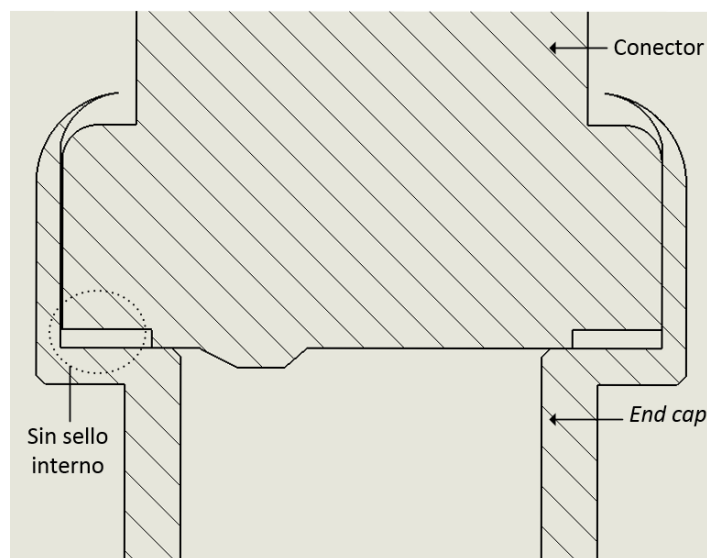


Fig. 28. Sensor EGR sin sello interno.

Para todas las piezas y con todos los gases que se probaran, se tomaron lecturas de nivel de fuga y posteriormente se graficó su comportamiento mediante una gráfica de series de tiempo. Para el cálculo de fuga, se utilizó ecuación 20:

- Pérdida de presión = ΔP = Presión final – Presión inicial.

Se procesan tres grupos por 30 segundos de presión. El nivel de fuga se calculó en intervalos de 5 segundos, hasta completar 30 segundos para cada grupo. La finalidad fue determinar qué tipo de gas puede detectar mayor fuga en los tres modos de falla más representativos en sensor el *EGR*.

3.4- TIEMPO ÓPTIMO PARA LA PRUEBA DE FUGA

Una vez que se definió el tipo de gas que mejor se adaptó a la prueba de caída de presión para detectar con mayor facilidad puntos de fuga, se procedió a realizar una prueba de tiempo de prueba, con las mismas piezas que se crearon intencionalmente con defectos para identificar cual es el tiempo más factible para probar los sensores en la prueba de caída de presión.

Se midió el nivel de fuga en intervalos de tiempo de 5 segundos, hasta completar 1 minuto de tiempo de prueba. Una vez que se capturaron los niveles de fuga, se calculó la pérdida de presión de un intervalo a otro, para de esta manera observar en que momento la pérdida de presión es 0. El hecho de buscar una pérdida de presión cercana a 0 se debe a que en este punto ya no hay pérdida de presión y por lo tanto ya no fuga más de lo que puede el sensor, por lo tanto, se pudo identificar el tiempo suficiente para detectar fugas en el sensor *EGR*.

El procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Se procesaron 3 sensores con modos de falla de sello dañado, fibra en sello y sin sello interno.
2. Se capturó el nivel de fuga en “n” intervalos de 5 segundos hasta completar 60 segundos. La ecuación utilizada para calcular la pérdida de presión o nivel de fuga, mencionada anteriormente, es:
 - Pérdida de presión = ΔP = Presión Inicial – Presión Final.

En este caso como la iteración pasa de un punto final de presión a un punto inicial, la presión final de la iteración 1, por ejemplo, va a ser considerada como presión inicial en iteración 2.

- Una vez que se calculó el nivel de fuga en cada sensor y en cada intervalo, ahora se restó el nivel de fuga de un intervalo al siguiente, para encontrar en que momento la diferencia de un intervalo a otro es lo más cercano posible a 0.

$$\text{Nivel de fuga en intervalos} = \Delta P_{n-1} - \Delta P_n \quad (21)$$

- Se identificó en que iteración el nivel de fuga ya es estable y ya no hay incremento de fuga. Para identificar qué tiempo de prueba es el más óptimo, se calculó el nivel de fuga entre intervalos o error, para determinar en qué punto la fuga es lo más cercana a 0. El criterio de aceptación utilizado es como se indica a continuación (La Tabla 5 indica cómo sería el cálculo de cada variable):

- $\text{Error} < 0 \rightarrow$ Se continúa con la iteración.
- $\text{Error} \sim 0 \rightarrow$ Se detiene la iteración.
 - En caso de que el error no es cercano a cero después de 60 segundos, se evaluaron los límites de control con sensores buenos para determinar si después de cierto tiempo los sensores ya están fuera de especificación, es decir:
 - Si $\Delta P >$ Límites de control superior, se detiene la iteración.

Iteración [n]	Tiempo prueba [s]	Sello dañado				Fibra en sello				Sin o-sello			
		Presión inicial [PSI]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [ΔP_n]	Error [$ \Delta P_{n-1} - \Delta P_n $]	Presión inicial [PSI]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [ΔP_n]	Error [$ \Delta P_{n-1} - \Delta P_n $]	Presión inicial [PSI]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [ΔP_n]	Error [$ \Delta P_{n-1} - \Delta P_n $]
1	5	PI1	PF1	PI1-PF1	$\Delta P_0 - \Delta P_1$	PI1	PF1	PI1-PF1	$\Delta P_0 - \Delta P_1$	PI1	PF1	PI1-PF1	$\Delta P_0 - \Delta P_1$
2	10	PF1	PF2	PF1-PF2	$\Delta P_1 - \Delta P_2$	PF1	PF2	PF1-PF2	$\Delta P_1 - \Delta P_2$	PF1	PF2	PF1-PF2	$\Delta P_1 - \Delta P_2$
3	15	PF2	PF3	PF2-PF3	$\Delta P_2 - \Delta P_3$	PF2	PF3	PF2-PF3	$\Delta P_2 - \Delta P_3$	PF2	PF3	PF2-PF3	$\Delta P_2 - \Delta P_3$
4	20	PF3	PF4	PF3-PF4	$\Delta P_3 - \Delta P_4$	PF3	PF4	PF3-PF4	$\Delta P_3 - \Delta P_4$	PF3	PF4	PF3-PF4	$\Delta P_3 - \Delta P_4$
5	25	PF4	PF5	PF4-PF5	$\Delta P_4 - \Delta P_5$	PF4	PF5	PF4-PF5	$\Delta P_4 - \Delta P_5$	PF4	PF5	PF4-PF5	$\Delta P_4 - \Delta P_5$
6	30	PF5	PF6	PF5-PF6	$\Delta P_5 - \Delta P_6$	PF5	PF6	PF5-PF6	$\Delta P_5 - \Delta P_6$	PF5	PF6	PF5-PF6	$\Delta P_5 - \Delta P_6$
7	35	PF6	PF7	PF6-PF7	$\Delta P_6 - \Delta P_7$	PF6	PF7	PF6-PF7	$\Delta P_6 - \Delta P_7$	PF6	PF7	PF6-PF7	$\Delta P_6 - \Delta P_7$
8	40	PF7	PF8	PF7-PF8	$\Delta P_7 - \Delta P_8$	PF7	PF8	PF7-PF8	$\Delta P_7 - \Delta P_8$	PF7	PF8	PF7-PF8	$\Delta P_7 - \Delta P_8$
9	45	PF8	PF9	PF8-PF9	$\Delta P_8 - \Delta P_9$	PF8	PF9	PF8-PF9	$\Delta P_8 - \Delta P_9$	PF8	PF9	PF8-PF9	$\Delta P_8 - \Delta P_9$
10	50	PF9	PF10	PF9-PF10	$\Delta P_9 - \Delta P_{10}$	PF9	PF10	PF9-PF10	$\Delta P_9 - \Delta P_{10}$	PF9	PF10	PF9-PF10	$\Delta P_9 - \Delta P_{10}$
11	55	PF10	PF11	PF10-PF11	$\Delta P_{10} - \Delta P_{11}$	PF10	PF11	PF10-PF11	$\Delta P_{10} - \Delta P_{11}$	PF10	PF11	PF10-PF11	$\Delta P_{10} - \Delta P_{11}$
12	60	PF11	PF12	PF11-PF12	$\Delta P_{11} - \Delta P_{12}$	PF11	PF12	PF11-PF12	$\Delta P_{11} - \Delta P_{12}$	PF11	PF12	PF11-PF12	$\Delta P_{11} - \Delta P_{12}$

Tabla 5. Nivel de fuga entre intervalos.

3.5- GRÁFICA DE CONTROL PARA DEFINICIÓN DE LÍMITES DE FUGA

Una vez que se procesaron las piezas con diferentes tipos de gases, se determinó que tipo de gas generó mayor cantidad de fuga en los sensores.

Al definir el gas de prueba para el sistema de caída de presión (el que genera mayor fuga), se procesaron 100 sensores EGR en buenas condiciones (sin fuga) en sistema de caída de presión para definir los límites de control del sistema.

Resumen de actividades para proceso de material:

1. Se seleccionó el gas de prueba que detecta mayor cantidad de fuga.
2. Se construyeron 100 piezas conocidas como buenas (sin fuga).
3. Se procesó el material en sistema de caída de presión.
4. Se recolectaron los datos de sistema de caída de presión de todas las piezas como se indica a continuación (Usar como referencia Tabla 6):
 - Columna 1 → Número de sensor [n].
 - Columna 2 → Voltaje inicial [V] = V_{i_n} .
 - Columna 3 → Presión inicial [PSI] = P_{i_n} .
 - Columna 4 → Voltaje Final [V] = V_{f_n} .
 - Columna 5 → Presión Final, se utiliza ecuación 19 para conversión de voltaje final a presión final [PSI] = P_{f_n} .
 - Columna 6 → Nivel de fuga [PSI] (o pérdida de presión), mediante la ecuación 20 = (Presión Final – Presión inicial) = ΔP_n

# Sensor	Voltaje inicial [V]	Presión inicial [PSI]	Voltaje Final [V]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [PSI]
1	V_{i1}	P_{i1}	V_{f1}	P_{f1}	ΔP_1
2	V_{i2}	P_{i2}	V_{f2}	P_{f2}	ΔP_2
3	V_{i3}	P_{i3}	V_{f3}	P_{f3}	ΔP_3
.
.
.
.
.
.
.
n	V_{i_n}	P_{i_n}	V_{f_n}	P_{f_n}	ΔP_n

Tabla 6. Lectura de voltaje y presión de sensores. Resultados se recolectan mediante el método de prueba de fuga "Caída de Presión".

Una gráfica de control o límites de control sirven para examinar si un proceso se encuentra en una condición estable o para asegurar que solo se acepten sensores sin fuga. La estructura de límites de control contiene una línea superior que marca el "límite superior de control (LSC)", y una línea inferior que marca el "límite inferior de control (LIC)". Para el estudio de caída de presión, sólo se requiere definir límite superior de control, puesto que sólo nos interesa saber cuáles sensores se encuentran por arriba de los límites de tolerancia. Una fuga en el sensor siempre será con fuga positiva. No existen fugas negativas o por debajo de 0 psi.

Para calcular los límites superior e inferior con base en las 100 piezas procesadas se utilizó:

1. Límite superior $\rightarrow LSC = X + 3 * S$ (22)

2. Límite inferior $\rightarrow LIC = X - 3 * S$ (23)

o Donde:

- X = Promedio de grupo.
- n = número de piezas.
- S = Desviación estándar.

Para calcular los límites de control, se procesaron 100 sensores en el sistema de fuga [25]:

1. Se calculó el promedio (X) $\rightarrow X = \sum X_i / N$ (24)

Donde: X_i – Promedio de 100 piezas.

N – número de piezas procesadas.

2. Se calculó la desviación estándar del grupo de 100 piezas $\rightarrow S = \sqrt{\sum |x - \bar{x}|^2 / n}$ (25)

Donde: \bar{x} - Media de conjunto de datos.

x – Un valor de conjunto de datos.

3. Se definió el Límite superior de control con ecuación 22 $\rightarrow LSC = X + 3 * S$.

3.6- ESTUDIO DE CAPACIDAD

Ya que se definieron los límites de control, ahora se realizó un estudio de capacidad de proceso (CPK) para confirmar que el proceso es estable. El estudio de capacidad es usado para comparar la dispersión del proceso contra las especificaciones del proceso y evaluar que tan capaz es el proceso. Pero antes de realizar un estudio de capacidad, se tiene que asegurar que el proceso está estadísticamente en control. Para poder verificar que está en control, se recomienda realizar una gráfica de control con material procesado (sensores buenos) para poder definir límites de tolerancia y confirmar que los sensores buenos no están fuera de especificación o tienen un comportamiento anormal.

Para el estudio de capacidad del proceso se procesaron 32 sensores buenos (sin fuga) y posteriormente se realizó el cálculo de CPK.

Rodríguez (2013) menciona que la manera para confirmar que el proceso es aceptable, debe ser con un CPK > 1.33, con lo que se asegura que los niveles de fuga de sensores están dentro de especificación.

Los pasos utilizados para determinar el CPK de proceso de caída de presión son los siguientes:

1. Seleccionar la característica a medir → Nivel de fuga.
2. Recolectar al menos 32 datos de nivel de fuga de sensores buenos.
3. Definir los límites de control (Procedimiento explicado en capítulo 3.5).
4. Calcular CPK:
 - a. Se define la desviación estándar con base a 32 sensores que se probaron por sistema de caída de presión con $S = \sqrt{\sum |x - \bar{x}|^2 / n}$
 - b. Se calcula el índice de capacidad de proceso →

$$CPK = \text{Min} [(\bar{x} - LEI) / 3S; (LES - \bar{x}) / 3S] \quad (26)$$

Donde:

LEI = Limite de especificación inferior.

LES = Limite de especificación superior.

\bar{x} = Promedio de 32 piezas.

S = Desviación estándar de 32 piezas.

Como se mencionó anteriormente, el criterio final para determinar si el sistema de detección de fuga por el método de caída de presión es aceptable, es si el CPK es mayor a 1.33.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 FUGA CON HELIO, NITRÓGENO Y AIRE

En el primer paso se procesaron piezas con diferentes modos de falla (sello interno dañado, fibra en sello interno y sin sello interno) con aire, nitrógeno y helio, para determinar qué tipo de gas ofrece la mejor detección.

Al procesar el material por el sistema de caída de presión, se obtuvieron los valores de fuga con un amplificador de señal y se utilizó ecuación 20 para calcular el valor de fuga en cada sensor y con diferente tipo de gas.

Las Fig. 29, Fig. 30 y Fig. 31 muestran el comportamiento en fuga que tuvieron los sensores con tres diferentes gases. La prueba se realizó por 15 segundos, y durante este tiempo y con los tres modos de falla, el sistema fue capaz de detectar mayor fuga con helio.

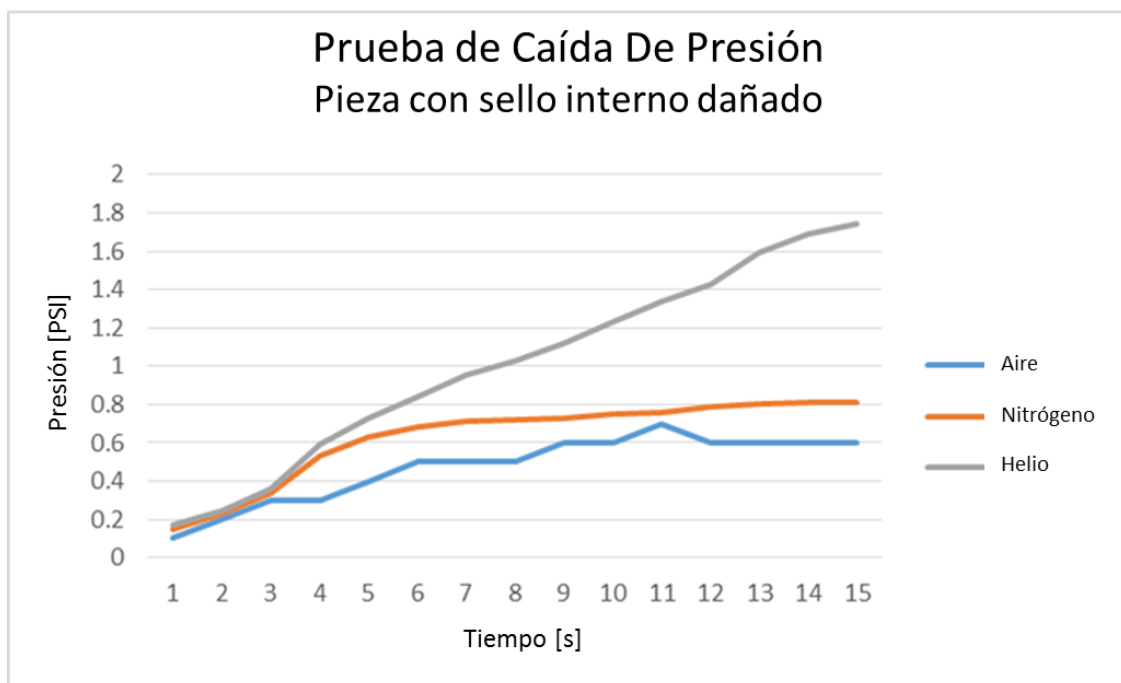


Fig. 29. Prueba de Caída de Presión con Aire, Nitrógeno y Helio. Se prueba una pieza con sello interno dañado para diferenciar el nivel de fuga con diferentes gases. Eje X (Tiempo [s]), indica tiempo de prueba. Eje Y (Presión [PSI]), indica cuanta presión fugaron los sensores.

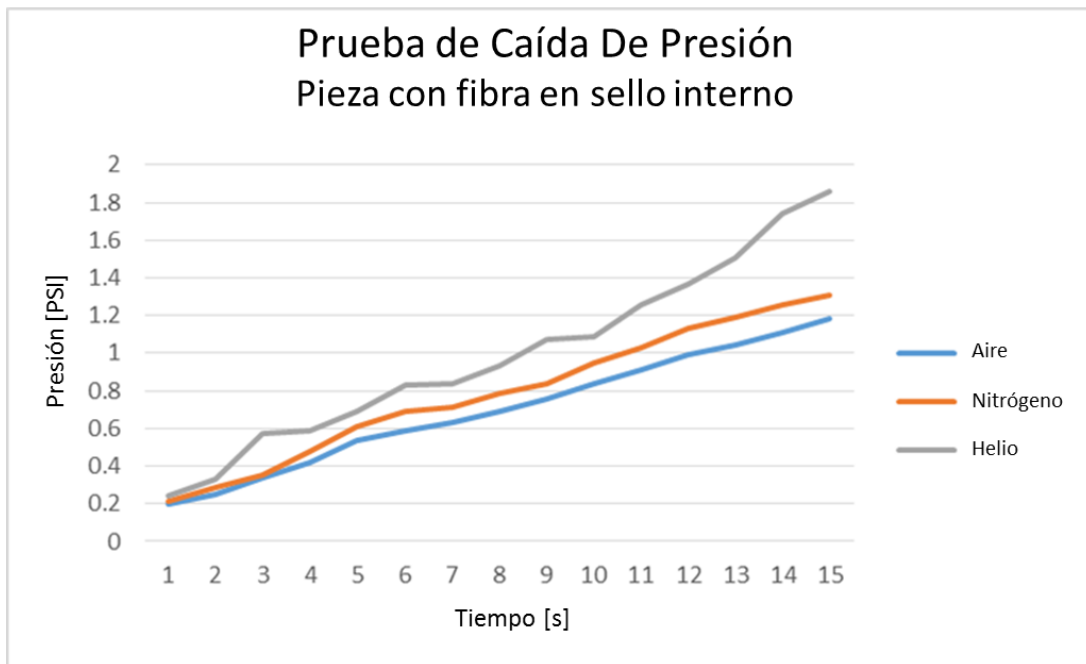


Fig. 30. Prueba de Caída de Presión con Aire, Nitrógeno y Helio. Se prueba una pieza con fibra en sello interno para diferenciar el nivel de fuga con diferentes gases. Eje X (Tiempo [s]), indica tiempo de prueba. Eje Y (Presión [PSI]), indica cuanta presión fugaron los sensores.

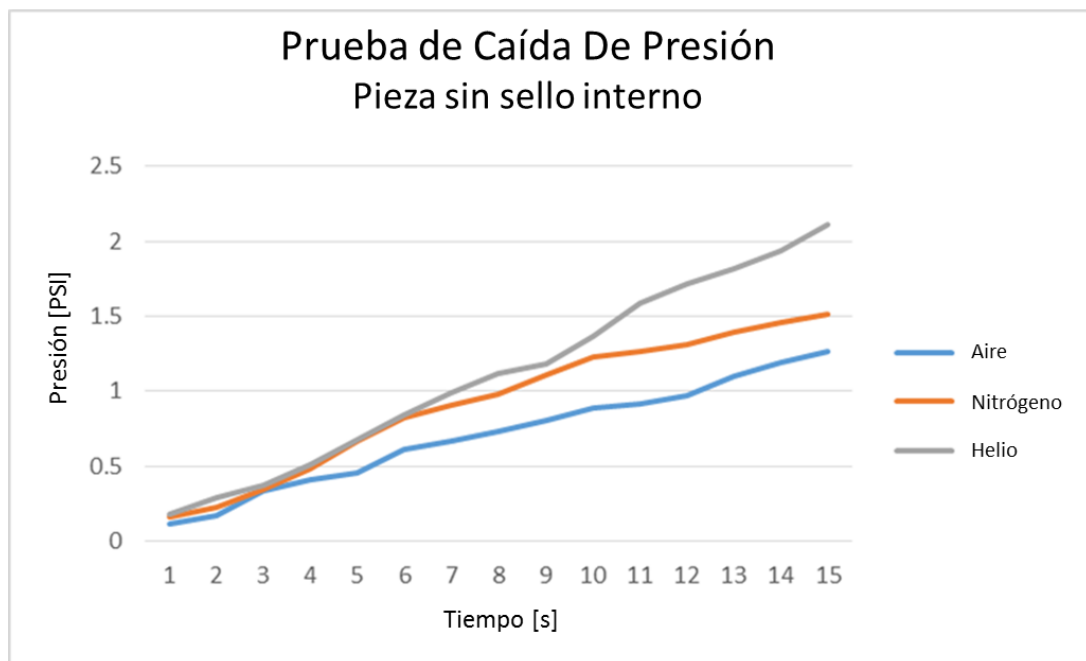


Fig. 31. Prueba de Caída de Presión con Aire, Nitrógeno y Helio. Se prueba una pieza sin sello interno para diferenciar el nivel de fuga con diferentes gases. Eje X (Tiempo [s]), indica tiempo de prueba. Eje Y (Presión [PSI]), indica cuanta presión fugaron los sensores.

De estos resultados se demuestra que con Helio es más fácil detectar pequeñas fugas. El helio puede escapar de manera más fácil por caminos que potencialmente puedan generar fuga durante la aplicación del sensor.

4.2 DEFINICIÓN DE TIEMPO DE PRUEBA

Enseguida se realizó la prueba de tiempo de fuga para asegurar una correcta detección por el sistema. Se procesaron los sensores con principales modos de falla durante 60 segundos con iteraciones de 5 segundos, y como resultados se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 7:

Iteración [n]	Tiempo [s]	Sello interno dañado				Fibra en sello interno				Sin sello interno			
		Presión inicial [PSI]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [PSI]	Error [$\Delta Pn-1 - \Delta Pn$]	Presión inicial [PSI]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [PSI]	Error [$\Delta Pn-1 - \Delta Pn$]	Presión inicial [PSI]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [PSI]	Error [$\Delta Pn-1 - \Delta Pn$]
1	5	200	199.19	0.81	0.81	200	199.25	0.75	0.75	200	198.99	1.01	1.01
2	10	199.19	197.84	1.35	0.54	199.25	198.06	1.19	1.19	198.99	197.3	1.69	0.68
3	15	197.84	196.05	1.79	0.44	198.06	196.45	1.61	1.61	197.3	195.18	2.12	0.43
4	20	196.05	193.77	2.28	0.49	196.45	194.33	2.12	2.12	195.18	192.31	2.87	0.75
5	25	193.77	191.09	2.68	0.4	194.33	191.86	2.47	2.47	192.31	189.01	3.3	0.43
6	30	191.09	188.24	2.85	0.17	191.86	189.26	2.6	2.6	189.01	185.42	3.59	0.29
7	35	188.24	185.3	2.94	0.09	189.26	186.64	2.62	2.62	185.42	181.6	3.82	0.23
8	40	185.3	182.35	2.95	0.01	186.64	184.02	2.62	2.62	181.6	177.34	4.26	0.44
9	45	182.35	179.4	2.95	0	184.02	181.39	2.63	2.63	177.34	172.67	4.67	0.41
10	50	179.4	176.44	2.96	0.01	181.39	178.75	2.64	2.64	172.67	167.68	4.99	0.32
11	55	176.44	173.47	2.97	0.01	178.75	176.1	2.65	2.65	167.68	162.17	5.51	0.52
12	60	173.47	170.5	2.97	0	176.1	173.43	2.67	2.67	162.17	156.21	5.96	0.45

Tabla 7. Iteraciones para verificación de fuga y cálculo de error de fuga.

Con los modos de falla de sello interno dañado y fibra en sello, cuando el tiempo ciclo está en 30 segundos, el error ya es cercano a cero, por lo cual quiere decir que el sistema ya está en su punto máximo de detección. En ambos modos de falla mencionados, el error es muy cercano a cero, sin embargo, el modo de falla sin sello interno no cumple con el criterio. Entre más es el tiempo de prueba parece que el sensor sin sello interno sigue fugando. En este punto se tendrá que evaluar los límites de control superior, para identificar si después de 30 segundos ya es suficiente para detectar la fuga en los sensores. A primera instancia parece que el sensor sin sello interno puede ser detectado con facilidad una vez que se definan los límites de control, ya que la fuga es muy gruesa e incluso mucho mayor que el resto de modo de fallas. Por lo cual, con base en los resultados obtenidos, se continuará con las siguientes pruebas utilizando un tiempo de prueba de 30 segundos. Una vez que se definan límites de control superior, se confirmará que a 30 segundos el sistema es capaz de detectar todos los posibles modos de falla en el sensor.

En la Fig. 32 se muestra el nivel de fuga con los posibles modos de falla en sensor EGR.

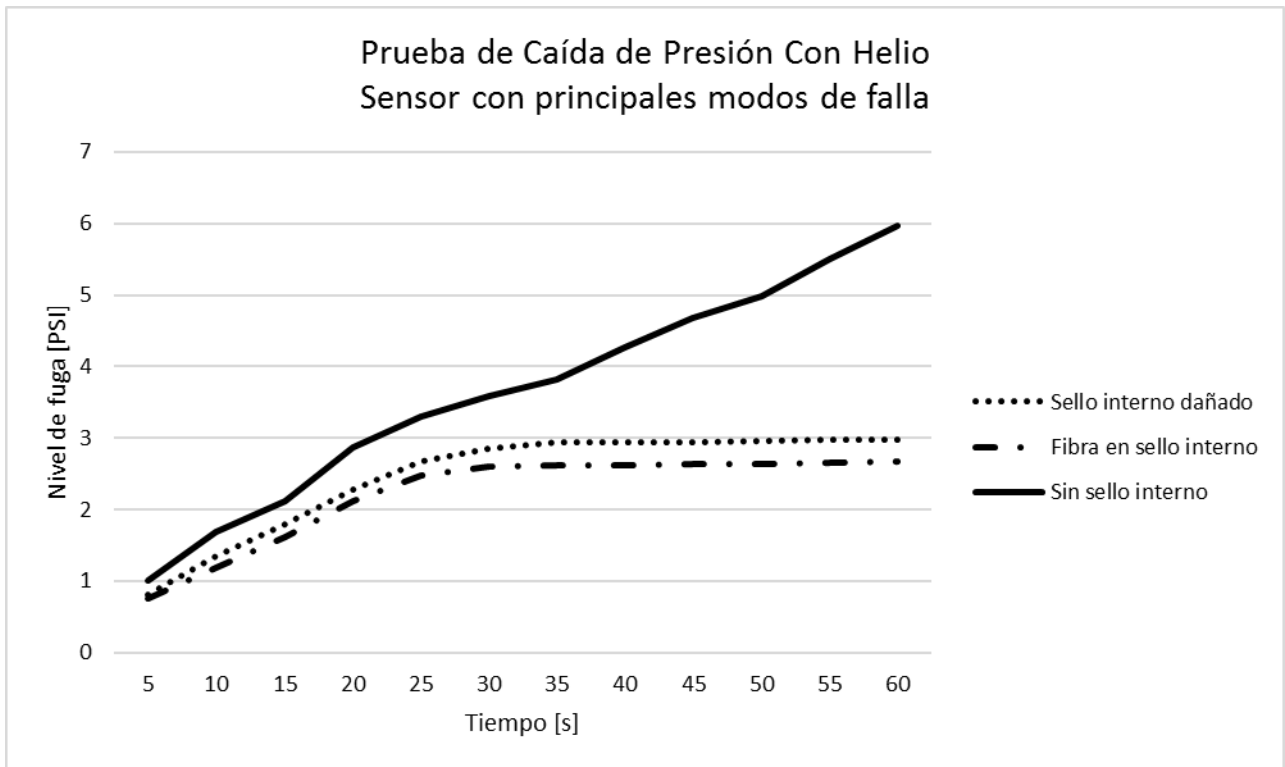


Fig. 32. Nivel de fuga con diferentes modos de falla. La prueba de fuga se realizó con método caída de presión durante 60 segundos. Eje X (Tiempo [s]), indica tiempo de prueba. Eje Y (Nivel de fuga [PSI]), indica cuanta presión fugaron los sensores.

4.3 DEFINICIÓN DE LÍMITES DE CONTROL PARA PRUEBA DE FUGA

Posteriormente se procesaron 100 sensores buenos (sin fuga) para determinar el comportamiento del material y definir los límites de control superior. El tipo de gas a utilizar es helio, ya que anteriormente se demostró que con este tipo de gas es más factible detectar fugas en el sensor.

# Sensor	Voltaje Inicial [V]	Presión Inicial [PSI]	Voltaje Final [V]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [Presión final - Inicial]
1	5	200.000	4.962	198.463	1.537
2	5	200.000	4.965	198.602	1.398
3	5	200.000	4.963	198.531	1.469
4	5	200.000	4.963	198.536	1.464
5	5	200.000	4.953	198.122	1.878
6	5	200.000	4.961	198.420	1.580
7	5	200.000	4.963	198.504	1.496
8	5	200.000	4.954	198.174	1.826
9	5	200.000	4.954	198.151	1.849
10	5	200.000	4.965	198.582	1.418
11	5	200.000	4.958	198.316	1.684
12	5	200.000	4.966	198.648	1.352
13	5	200.000	4.964	198.562	1.438
14	5	200.000	4.952	198.089	1.911
15	5	200.000	4.968	198.708	1.292
16	5	200.000	4.956	198.229	1.771
17	5	200.000	4.962	198.462	1.538
18	5	200.000	4.964	198.557	1.443
19	5	200.000	4.957	198.277	1.723
20	5	200.000	4.965	198.606	1.394
21	5	200.000	4.966	198.642	1.358
22	5	200.000	4.951	198.046	1.954
23	5	200.000	4.969	198.780	1.220
24	5	200.000	4.968	198.710	1.290
25	5	200.000	4.967	198.679	1.321
26	5	200.000	4.969	198.745	1.255
27	5	200.000	4.951	198.020	1.980
28	5	200.000	4.954	198.144	1.856
29	5	200.000	4.957	198.274	1.726
30	5	200.000	4.967	198.671	1.329
31	5	200.000	4.951	198.030	1.970
32	5	200.000	4.966	198.645	1.355
33	5	200.000	4.952	198.090	1.910
34	5	200.000	4.968	198.740	1.260
35	5	200.000	4.963	198.517	1.483
36	5	200.000	4.964	198.576	1.424
37	5	200.000	4.953	198.130	1.870
38	5	200.000	4.952	198.093	1.907
39	5	200.000	4.966	198.658	1.342
40	5	200.000	4.951	198.060	1.940
41	5	200.000	4.965	198.616	1.384
42	5	200.000	4.960	198.400	1.600
43	5	200.000	4.968	198.716	1.284
44	5	200.000	4.951	198.058	1.942
45	5	200.000	4.956	198.239	1.761
46	5	200.000	4.956	198.236	1.764
47	5	200.000	4.959	198.362	1.638
48	5	200.000	4.952	198.079	1.921
49	5	200.000	4.955	198.194	1.806
50	5	200.000	4.953	198.116	1.884
51	5	200.000	4.956	198.245	1.755
52	5	200.000	4.953	198.108	1.892
53	5	200.000	4.951	198.047	1.953
54	5	200.000	4.951	198.046	1.954
55	5	200.000	4.959	198.373	1.627
56	5	200.000	4.969	198.761	1.239
57	5	200.000	4.962	198.479	1.521
58	5	200.000	4.958	198.319	1.681
59	5	200.000	4.966	198.622	1.378
60	5	200.000	4.966	198.620	1.380
61	5	200.000	4.953	198.131	1.869
62	5	200.000	4.967	198.696	1.304
63	5	200.000	4.961	198.426	1.574
64	5	200.000	4.960	198.404	1.596
65	5	200.000	4.967	198.700	1.300
66	5	200.000	4.962	198.474	1.526
67	5	200.000	4.956	198.222	1.778
68	5	200.000	4.958	198.338	1.662
69	5	200.000	4.965	198.619	1.381
70	5	200.000	4.956	198.250	1.750
71	5	200.000	4.956	198.252	1.748
72	5	200.000	4.962	198.473	1.527
73	5	200.000	4.957	198.296	1.704
74	5	200.000	4.965	198.586	1.414
75	5	200.000	4.955	198.196	1.804
76	5	200.000	4.953	198.128	1.872
77	5	200.000	4.966	198.639	1.361
78	5	200.000	4.958	198.333	1.667
79	5	200.000	4.965	198.587	1.413
80	5	200.000	4.965	198.620	1.380
81	5	200.000	4.964	198.580	1.420
82	5	200.000	4.965	198.597	1.403
83	5	200.000	4.953	198.132	1.868
84	5	200.000	4.969	198.773	1.227
85	5	200.000	4.955	198.208	1.792
86	5	200.000	4.966	198.649	1.351
87	5	200.000	4.961	198.447	1.553
88	5	200.000	4.967	198.693	1.307
89	5	200.000	4.971	198.820	1.180
90	5	200.000	4.965	198.607	1.393
91	5	200.000	4.958	198.336	1.664
92	5	200.000	4.959	198.347	1.653
93	5	200.000	4.952	198.092	1.908
94	5	200.000	4.969	198.757	1.243
95	5	200.000	4.959	198.366	1.634
96	5	200.000	4.964	198.546	1.454
97	5	200.000	4.968	198.717	1.283
98	5	200.000	4.958	198.320	1.680
99	5	200.000	4.954	198.154	1.846
100	5	200.000	4.961	198.444	1.556

Tabla 8. Fuga de piezas buenas. Se mide el voltaje final y se convierte a presión. Al tener presión final, se calcula el diferencial de presión y se calcula la fuga en sensor EGR.

Como se muestra en la Tabla 8, con el uso de un amplificador de señal se obtiene voltaje final. La presión final se vacía en la tabla 8 (Columna "presión final") y enseguida se calcula la diferencia de presión final e inicial. Con este diferencial de presión se indica la pérdida de presión o nivel de fuga que tuvo el sensor. En la Fig. 33 se pueden visualizar los resultados.

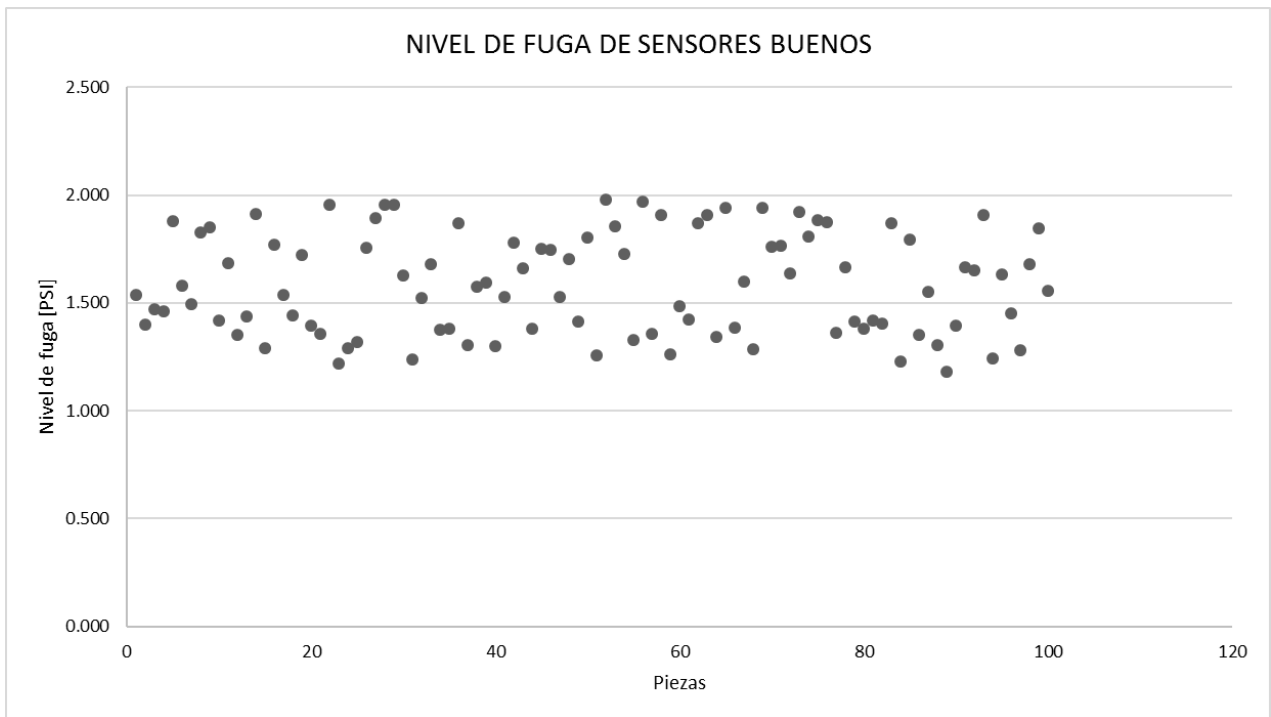


Fig. 33. Nivel de fuga detectado por el sistema de “Caída de Presión”. El nivel de fuga se basa en la lectura medida por el equipo, al momento de hacer la conversión de voltaje (v) a presión (psi), para calcular el diferencial de presión y calcular cuanta presión perdió el sensor.

Una vez que se procesaron 100 sensores en sistema de fuga “Caída de Presión”, se continuó con el cálculo de límite de control superior con base en el comportamiento del material:

- Límite superior $\rightarrow LSC = X + (3 * S)$
 - Promedio $\rightarrow X = \sum X_i / N = 158.7 \text{ PSI} / 100 = 1.59 \text{ PSI}$
 - Desviación estándar $\rightarrow S = \sqrt{\sum |x - \bar{x}|^2 / n} = \sqrt{5.37 / 100} = 0.23 \text{ PSI}$
 - Límite superior $\rightarrow LSC = X + (3 * S) = 1.59 + (3 * 0.23) = 2.28 \text{ PSI}$

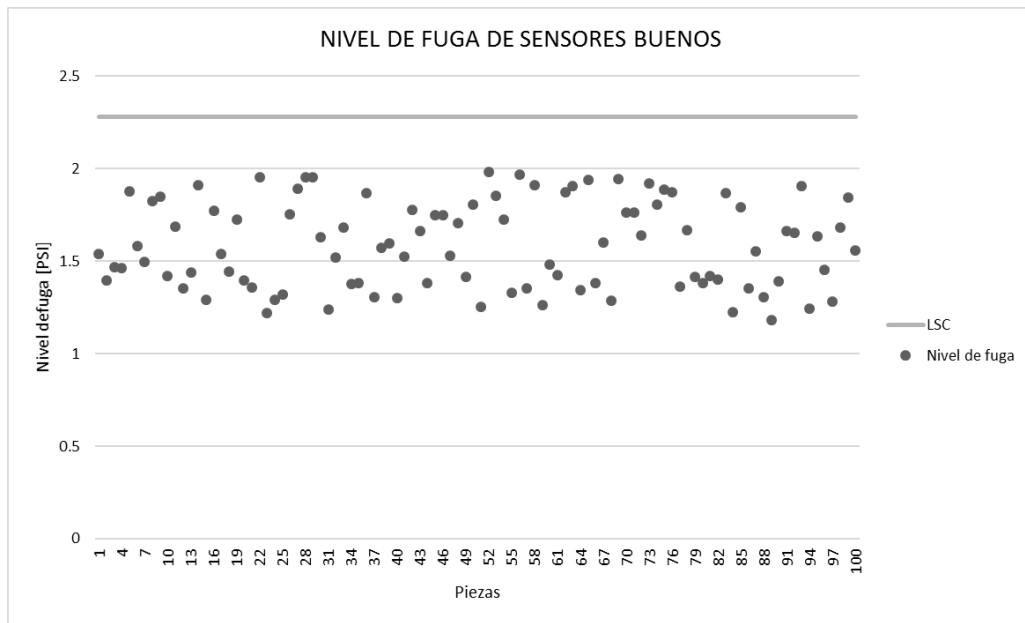


Fig. 34. Nivel de fuga de sensores *EGR* con límite de control superior. Debido a que una fuga sólo puede ser positiva, no es necesario calcular límites de control inferior.

Para este momento en donde ya se definieron límites de control (Fig. 34), se vuelven a evaluar los resultados de fuga con diferentes modos de falla para determinar si con los límites definidos el sistema es capaz de detectar las fugas en sensor con el tiempo de prueba definido anteriormente (30 segundos).

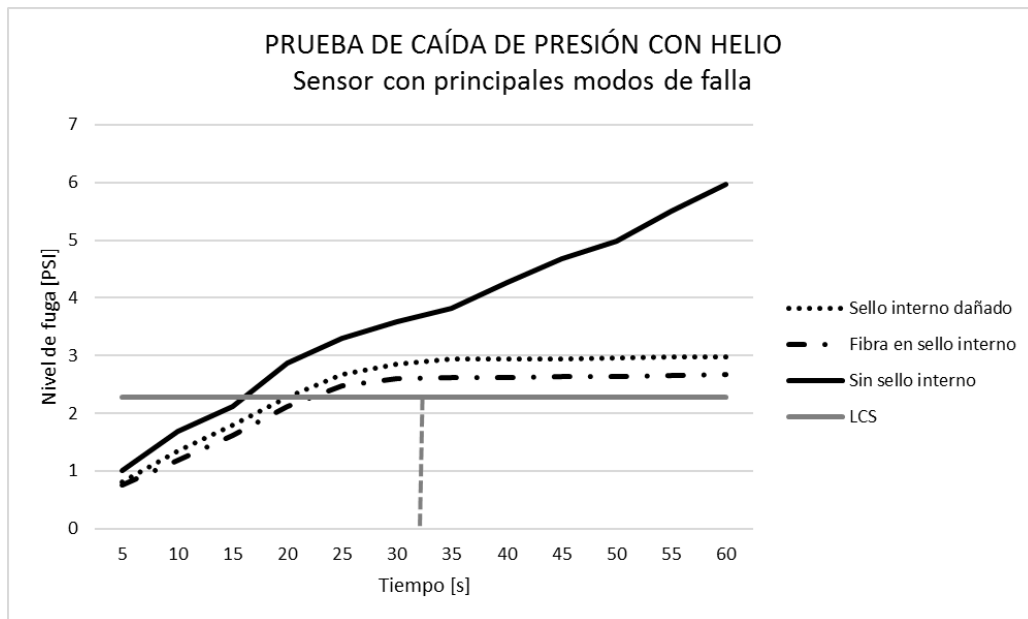


Fig. 35. Nivel de fuga de principales modos de falla en sensor *EGR*. Teniendo en cuenta límites de control superior, sistema es capaz de detectar fuga en sensores.

En la Fig. 35 se observa que tiempo de prueba de 30 segundos y usando helio como gas de prueba, es suficiente para determinar los modos de falla (fuga) en el sensor *EGR*.

4.4 CAPACIDAD DEL NUEVO PROCESO

Posteriormente a que se calcularon los límites de control superior con el sistema de caída de presión, ahora se continúa con el cálculo de estudio de capacidad con 32 sensores sin fuga que se procesaron para demostrar que el proceso es estable y no se presentan anomalías en el proceso de caída de presión.

Con los datos obtenidos se realizó estudio de capacidad de proceso para determinar si los valores de fuga obtenidos son aceptables y si el nuevo sistema es constante en medición de fuga de sensores *EGR*. En la Tabla 9 se muestran los resultados por pieza, con los cuales se calculará el CPK de nuevo proceso para detección de fuga.

Sensor	Voltaje inicial [V]	Presión inicial [PSI]	Voltaje Final [V]	Presión Final [PSI]	Nivel de fuga [PSI]	$\sum (x-\bar{x})^2$
1	5	200.000	4.963	198.513	1.487	0.006201
2	5	200.000	4.961	198.452	1.548	0.000315
3	5	200.000	4.957	198.281	1.719	0.023704
4	5	200.000	4.965	198.586	1.414	0.023045
5	5	200.000	4.957	198.272	1.728	0.026532
6	5	200.000	4.962	198.470	1.530	0.001266
7	5	200.000	4.959	198.354	1.646	0.006494
8	5	200.000	4.956	198.224	1.776	0.044549
9	5	200.000	4.955	198.201	1.799	0.054527
10	5	200.000	4.965	198.592	1.408	0.024823
11	5	200.000	4.959	198.366	1.634	0.004707
12	5	200.000	4.960	198.398	1.602	0.001301
13	5	200.000	4.965	198.612	1.388	0.031584
14	5	200.000	4.955	198.190	1.810	0.059859
15	5	200.000	4.961	198.458	1.542	0.000547
16	5	200.000	4.957	198.279	1.721	0.024099
17	5	200.000	4.963	198.512	1.488	0.006024
18	5	200.000	4.963	198.507	1.493	0.005273
19	5	200.000	4.958	198.327	1.673	0.011547
20	5	200.000	4.964	198.556	1.444	0.014858
21	5	200.000	4.955	198.192	1.808	0.059025
22	5	200.000	4.955	198.199	1.801	0.055542
23	5	200.000	4.961	198.430	1.570	2.55E-05
24	5	200.000	4.956	198.250	1.750	0.03419
25	5	200.000	4.964	198.546	1.454	0.012397
26	5	200.000	4.957	198.295	1.705	0.019553
27	5	200.000	4.955	198.198	1.802	0.055992
28	5	200.000	4.963	198.517	1.483	0.006748
29	5	200.000	4.957	198.296	1.704	0.019308
30	5	200.000	4.961	198.423	1.577	0.000144
31	5	200.000	4.960	198.411	1.589	0.000553
32	5	200.000	4.958	198.319	1.681	0.013356

Tabla 9. Resultados de nivel de fuga con Caída de Presión. Se procesaron 32 sensores *EGR* y se calculó el nivel de fuga para estudio de capacidad del proceso.

Cálculo CPK:

1. Promedio $\rightarrow X = \sum X_i / N = 51.775 \text{ PSI} / 32 = 1.618 \text{ PSI}$
2. Desviación estándar $\rightarrow S = \sqrt{\sum |x - \bar{x}|^2 / n} = \sqrt{0.648 / 32} = 0.14 \text{ PSI}$
3. Índice de capacidad de proceso:

$$\text{CPK} = \text{Min} [(\bar{x} - \text{LEI}) / 3S; (\text{LES} - \bar{x}) / 3S] = \text{Min} [(2.28 - 1.6282) / (3 \cdot 0.14)] = 1.69$$

Por lo tanto, debido a que $\text{CPK} > 1.33$, se confirmó de esta manera que el proceso de caída de presión es estable y sensores están dentro de especificación.

CONCLUSIONES

Los principales objetivos planteados fueron desarrollar un sistema que sea eco-eficiente, sustentable y asegure la calidad del producto. Con base en los experimentos realizados se logró demostrar que el método de caída de presión, como método de prueba de fuga es muy efectivo para la detección de potenciales fugas en el sensor *EGR*, y de igual manera también cumple con todos los objetivos planteados en la investigación.

Se ha mejorado la interfaz entre el operador y la máquina, para que el nuevo sistema de caída de presión facilite las actividades del operador, y la detección ya no sea dependiente del mismo. La detección pasó de ser un método dependiente del operador, a un método semi-automático, en donde las actividades del operador son mínimas y la detección ya es totalmente dependiente del equipo.

Durante las investigaciones realizadas, se confirmó que existen diferentes tipos de gases para realizar la prueba de fuga en los dispositivos de prueba. Planteamientos teóricos demuestran que el helio es uno de los gases nobles con menor peso molecular, lo cual permite que el gas escape por puntos pequeños de fuga que a largo plazo pueden originar potenciales modos de falla. Con base en esta teoría, durante el procedimiento de investigación se planteó probar piezas con diferentes tipos de gases, y como resultado se confirmó que con el helio es mucho más sencillo detectar todos los posibles modos de falla en el sensor, incluso la fuga en el sensor es más prolongada e inmediata que con otros tipos de gases.

Aunado al tipo de gas a utilizar, también se evaluó el funcionamiento de un transductor de presión, el cual es muy sensible a los cambios de presión. En combinación con el efecto de las galgas extensométricas y puente de *Wheatstone*, se pueden generar señales eléctricas, las cuales se pueden tomar en consideración para calcular la pérdida de presión en el sistema. A partir de este principio se desarrolló un método para conversión de voltaje a presión, y así poder evaluar la pérdida de presión en el dispositivo.

Una vez definidos los métodos de prueba, se calcularon límites de control para diferenciar entre sensores con fuga y sin fuga, y al final se procedió con un estudio de capacidad, para demostrar finalmente que el nuevo equipo es capaz de detectar todos

los potenciales modos de falla. El CPK obtenido es de 1.67, lo que indica que el equipo cuenta con una capacidad de proceso aceptable. De esta manera se confirma y acepta la hipótesis: la detección de fuga en sensores *EGR*, se puede garantizar mediante el método de caída de presión.

Por otro lado, durante las investigaciones realizadas se observó que existen diversos métodos de prueba de fuga, de los cuales algunos requieren de un alto costo de mantenimiento y no son tan efectivos. Por lo cual es importante siempre tener en cuenta las especificaciones del cliente que se tienen que cumplir para poder asegurar correcta calidad del producto. Con base en ello, no siempre es necesario hacer grandes inversiones para obtener un equipo confiable para cumplir con la calidad de producto. En muchas ocasiones los equipos que requieren de una gran inversión y tecnología también requieren de altos costos de mantenimiento, lo cual podría ser contraproducente por los gastos requeridos.

El método de caída de presión no implica altos costos a comparación de otros equipos y su nivel de detección de fuga en sensores *EGR* ha demostrado ser efectivo, hasta tal grado que los rechazos del cliente se han reducido a 0 PPM. Es importante realizar los estudios necesarios para poder obtener los parámetros de proceso adecuados para que el equipo sea robusto y trabaje lo más eficiente posible.

RECOMENDACIONES

Se deben de dar a conocer a Sensata Technologies los resultados de investigación con el método de caída de presión, ya que este tipo de prueba de fuga resulta ser más efectivo en la detección de fallas con los sensores *EGR* y representa un sistema de bajo costo de mantenimiento.

También se recomienda realizar una investigación futura de costos de operación y nivel de efectividad del sistema de caída de presión, contra todos los equipos actuales de Sensata, para determinar cuáles procesos pueden ser reemplazados por el sistema de caída de presión de Helio.

REFERENCIAS

- [1] Sensata Technologies. "Aplicaciones de sensores y controles". 2012.
- [2] Anónimo. "Gases de Escape y Sistemas Anticontaminación". 2014.
<http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.htm>.
- [3] Rufe P. *Fundamentals of manufacturing (3rd edition): Sustainable manufacturing*. Society of Manufacturing Engineers. SME. 2013. P. 276.
- [4] Naciones Unidas. "Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". Artículo. 1998. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- [5] Roncero A. "Ahorro de Combustible, Generadores de HHO y Sistemas EGR, Recirculación de Gases de Escape ". Artículo de internet. 2012. http://agrupasuma.com/forum/topics/ahorro-de-combustible-generadores-de-hho-y-sistemas-egr?xg_source=activity.
- [6] Khemani H. "What is Thermistor and How it Works?". Artículo de internet. 2009. <https://www.brighthubengineering.com/hvac/53511-how-a-thermistor-works/>.
- [7] Anónimo. "Transductores, sensores y captadores". Artículo de internet. https://www.edu.xunta.gal/centros/iescamposanalberto/aulavirtual2/pluginfile.php/9022/mod_resource/content/0/Sistemas_de_Control.pdf.
- [8] Gillum R. *Industrial Pressure, Level, and Density Measurement, Second Edition: Pressure Transducers and Pressure Gages*. ISA. 2009. p. 85.
- [9] Chattopadhyay S., Sarkar J. y Bera C. *A low cost design and development of a reluctance type pressure transducer*. Elsevier. 2012. No 46. p. 495.
- [10] Idrovo Urgiles P. y Quintanilla Molina L. Estudio de las galgas Extensométricas. Principio de funcionamiento, características de las galgas Extensométricas y campos de aplicación de las galgas Extensométricas (Tesis). Ecuador. 2010. p. 3-6.
- [11] Patience G. *Experimental Methods and Instrumentation for Chemical Engineers 2nd Edition: Electrical properties of strained metals*. Canadá: Elsevier. 2017. p. 109.

- [12] Anónimo. "Equipment and system dehydrating, charging, and testing: Leak detection methods". *ASHRAE Handbook*. 2010.
- [13] Martínez C. "Análisis de Esfuerzos y Deformaciones Utilizando Strain Gage". <http://www.vibrotechnology.org/servicio/Analisis-de-Esfuerzos-y-Deformaciones-Utilizando-Strain-Gage>.
- [14] C. N. Jackson, C. N. Sherlock, P. O. Moore, and American Society for Nondestructive Testing, Eds., *Leak testing*. Columbus, Ohio: American Society for Nondestructive Testing, 1998.
- [15] Bergoglio M. y Mari D. *Leak rate metrology for the society and Industry*. Elsevier. 2011. No 45. p. 2436.
- [16] *Vacuum Engineering*. "Leak rate and different leak rate for different gases". 2011. <http://vac-eng.com/wp-content/uploads/LEAK%20RATE%20DEFINITION.pdf>.
- [17] Falkner P., Peacock A. y Schulz R. *Instrumentation for Planetary Exploration Missions*. Mass Spectrometer. Elsevier. 2007. P. 734.
- [18] Sensata Technologies. "Funcionamiento Espectrómetro de Masa". 2012.
- [19] Kossina J. y Meyer A. *Helium leak testing of packages for oral drug products*. Elsevier. 2010.
- [20] *Vacuum Engineering*. "LEAK TESTING METHODOLOGIES". <http://vac-eng.com/wp-content/uploads/LEAK%20TESTING%20METHODOLOGIES.pdf>.
- [21] American Water Works Association. *Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water: Different integrity testing methods based on fluid flow*. 2016. P. 68
- [22] Meng L., Yuxing L., Wuchang W. y Juntao F. *Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method*. Elsevier. 2011. Vol. 25.
- [23] Greenhouse H. *Hermeticity of Electronic Packages 2nd Edition: Leak rates for different gases*. Elsevier. 2011.
- [24] Anónimo. "GUÍA DE FÍSICA. TEMA: LEYES DE LOS GASES IDEALES". <https://es.scribd.com/document/150039479/Masa-Molecular-de-Algunos-Gases>.
- [25] Anónimo. "Control estadístico de procesos: Gráficos de control". <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/kaiser/esp/calidad/controe7.pdf>.

[26] Rodríguez M. *Statistical Process Control for the FDA-Regulated Industry*. ASQ Quality Press. 2013.