

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada  
Dirección de Posgrado



*Prueba de confiabilidad de sello  
de un sensor de presión MEMS*

TESIS QUE PRESENTA

**Ing. Marco Vinicio Olmos Morales**  
**Asesor: Dra. Rocío Montserrat Campos García**

Para obtener el grado de

**Maestro en  
Manufactura Avanzada**

Aguascalientes, Ags., México  
marzo, 2022

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR

Aguascalientes, Ags. a 10 de diciembre del 2021.

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

La abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del ING. MARCO VINICIO OLMOS MORALES., una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "PRUEBA DE CONFIABILIDAD DE SELLO DE UN SENSOR DE PRESIÓN MEMS" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **MAESTRO EN MANUFACTURA AVANZADA**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.



---

Dra. Rocío Montserrat Campos García  
Asesor Académico

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR

Ciudad, Estado, 10 de febrero del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico  
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **ING. MARCO VINICIO OLMOS MORALES**, cuyo título es:

### **PRUEBA DE CONFIABILIDAD DE SELLO DE UN SENSOR DE PRESIÓN MEMS**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,



---

Mtro. Alfredo Chávez Luna

## DEDICATORIA

**A mis Padres.**

Que nunca dejaron de aprender.

## **AGRADECIMIENTOS**

Con agradecimiento sincero para la Dra. Monserrat Campos, por su infinita paciencia.

## RESUMEN

Este trabajo presenta un método para realizar una Prueba de Fuga no destructiva en un sensor de presión automotriz, concretamente usado en los sistemas de control de emisiones de escape en los motores a diésel de vehículos pesados. El método hace uso del hecho de que el sensor en su interior contiene un elemento de medición de presión basado en tecnología MEMS, inmerso en aceite dentro de una cámara que debería estar aislada con respecto de la atmosfera. Objetivo: Construir un prototipo que demuestre la viabilidad de una prueba de hermeticidad al 100%, para un dispositivo de presión MEMS, que tiene una cámara llenada con aceite, y que se encuentra actualmente en producción en masa, sin efectos perjudiciales sobre la productividad o la calidad. Se hizo una revisión de la literatura para revisar las técnicas de Prueba de Fuga disponibles. Se muestra tanto en el Procedimiento de Investigación como en la sección de Resultados que no existe un método ampliamente utilizado que pueda aplicarse en este caso, principalmente debido a las particularidades de la forma y el tamaño del sensor. Se demuestra en la discusión experimental la viabilidad del método a través de análisis estadístico tanto de la confiabilidad del sistema de medición como de la diferenciación que el método puede hacer entre piezas buenas y malas, validando que estas piezas son buenas o malas a través de pruebas de vida acelerada. Los resultados principales son dos: 1. Se demostró la viabilidad del método usando un prototipo con un acoplamiento mecánico relativamente sencillo, sin usar gases inertes, y con instrumentación ampliamente disponible en el mercado. 2. En el caso particular del sensor del estudio, se pudo demostrar que con un tiempo de prueba de 20 segundos es posible distinguir entre piezas buenas y malas sin riesgo de generar clasificaciones incorrectas. Esto permite la viabilidad de construir una máquina de producción en masa que no requiera una inversión alta dado que solo es necesario probar 5 piezas simultáneamente.

**Palabras clave:** Ingeniería y tecnología, Tecnología de vehículos de motor, Motores diésel, MEMS, Hermeticidad, Prueba de fuga.

## ABSTRACT

This paper presents a method to perform a non-destructive Leak Test on an automotive pressure sensor, specifically used in exhaust emission control systems in diesel engines of heavy vehicles. The method makes use of the fact that the sensor inside contains a pressure measuring element based on MEMS technology, immersed in oil inside a chamber that should be isolated from the atmosphere. Objective: Build a prototype that demonstrates the feasibility of a 100% hermeticity test, for a MEMS pressure device, which has a chamber filled with oil, and is currently in mass production, without detrimental effects either on productivity or quality. A literature review was made in order to explore the feasibility of any available Leak Test techniques. It is shown both in the Investigation Procedure and in the Results section that there is no widely used method that can be applied in this case, mainly because of to the peculiarities in geometry and size of the sensor. The viability of the method is demonstrated in the Experimental discussion through statistical analysis of both the reliability of the measurement system and the differentiation that the method can make between good and bad pieces, validating that these pieces are good or bad through accelerated life tests. There are two main results: 1. The feasibility of the method was demonstrated using a prototype that has a relatively simple mechanical coupling, without using inert gases, and with instrumentation widely available on the market. 2. In the particular case of the sensor under study, it could be shown that with a test time of 20 seconds it is possible to distinguish between good and bad parts without the risk of generating incorrect classifications. This allows for the feasibility of building a mass production machine that does not require a high investment since it is only necessary to test 5 pieces simultaneously.

**Keywords:** Engineering and technology, Automotive technology, Diesel engines, MEMS, Hermeticity, Leak test.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
GLOSARIO .....	xiii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	7
1.4 OBJETIVOS.....	7
1.4.1 Objetivo principal.....	7
1.4.2 Objetivos específicos .....	7
1.5 HIPÓTESIS.....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	9
2.1 PROBLEMÁTICA DE LAS EMISIONES DE MOTORES A DIÉSEL.....	9
2.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES A DIÉSEL.....	11
2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL DE EMISIONES EN MOTORES A DIÉSEL .....	20
2.4 DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN DEL SENSOR OBJETO DE ESTE ESTUDIO.....	31
2.5 CLASIFICACIÓN DE POSIBLES FALLAS EN SENSORES MEMS .....	42
2.6 DESCRIPCIÓN DE INTERFACES INTERNAS EN EL EGR DP .....	43
2.7 POSIBLES ALTERNATIVAS PARA PRUEBA DE HERMETICIDAD .....	46
3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN .....	49
4. RESULTADOS .....	61
4.1 EXPERIMENTO 1 .....	61
4.2 EXPERIMENTO 2.....	66
4.3 EXPERIMENTO 3.....	68
4.4 SIGUIENTE PASO: DESARROLLO DE MÁQUINA DE PRODUCCIÓN.....	79
CONCLUSIONES .....	80

RECOMENDACIONES .....	81
APORTACION DE LA TESIS.....	82
APORTACION SOCIAL DE LA TESIS.....	83
REFERENCIAS.....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático de un paquete en un dispositivo MEMS .....	5
Figura 2: Ciclo de cuatro tiempos en los motores de combustión interna. ....	13
Figura 3: Esquemático de las partes mecánicas de un cilindro. ....	13
Figura 4: Desplazamiento lineal de las válvulas con respecto al desplazamiento angular del cigüeñal.....	18
Figura 5: Representación gráfica de la ignición del combustible. ....	20
Figura 6: Zonas de generación de contaminantes como función de la temperatura y el inverso de la mezcla de aire. ....	21
Figura 7: Componentes de las emisiones en motores a diésel y gasolina, en porcentaje. ....	23
Figura 8: Grafico de zonas de no traspaso como función de la velocidad y torque del motor.....	24
Figura 9. Metas de para control de emisiones en Europa y Estados Unidos.....	26
Figura 10. Cronograma de implementación de normas regulatorias.....	27
Figura 11: Zonas de generación de contaminantes con y sin EGR.....	30
Figura 12: Esquemático de los controles de EMD posteriores a la combustión en un motor que cumple tanto con US 2010 como con Euro VI.....	31
Figura 13: Esquemático de un sistema de suministro de aire en un motor a diésel.	32
Figura 14: Generación de EMD como función de $\lambda$ y del %EGR. ....	33
Figura 15: Esquemático de la ubicación del EGR dP en el sistema de control de EMD.....	34
Figura 16: Representación de las condiciones usadas en el desarrollo del modelo para calcular el caudal másico en el EGR.....	35
Figura 17: Corte transversal del EGR dP y esquemático de la deflexión de la membrana de silicio en el dado MEMS. ....	37
Figura 18: Transmisión de la presión de los gases de escape hacia el dado MEMS. ....	39
Figura 19: Representación de la posición física de las piezo-resistencias en el dado MEMS y su configuración eléctrica.....	40
Figura 20: Orientación de las piezo-resistencias en una membrana de silicio cuadrada.....	42
Figura 21: Posición relativa de las interfaces que forman la cavidad de aceite en el EGR dP.....	44

Figura 22: Arreglo típico de sello vidrio-metal.....	45
Figura 23: Maquina de soldadura por resistencia para el EGR dP. ....	49
Figura 24: Esquemático de la aplicación de energía en el proceso de soldadura por resistencia para el EGR dP. La corriente circula a través del balín y la placa base.....	49
Figura 25: Esquemático de las dimensiones nominales después de soldar el balín a la base.....	50
Figura 26. Estimado de cantidad de piezas rechazadas por fuga en la interfaz dada la información disponible sobre fallas confirmadas. ....	52
Figura 27: Corte transversal de piezas con fuga de aceite confirmada. El ancho del canal de fuga no llega a los 10 $\mu\text{m}$ . ....	53
Figura 28: Fotografía de burbuja observada en prueba de fuga. ....	57
Figura 29: Esquemático para el cálculo del flujo a través de una grieta de apertura reducida comparada con su longitud. ....	58
Figura 30: Flujos esperados aplicando aire a diferentes presiones, para diferentes tamaños de apertura. ....	59
Figura 31. Prototipo para la aplicación de Prueba de Fuga. ....	61
Figura 32. Prueba de validación del sistema de medición del Prototipo. ....	64
Figura 33: Prueba de hermeticidad como se define en este trabajo. Las piezas con fuga fueron detectadas como una alteración del voltaje de salida. ....	66
Figura 34: Resultados estadísticos del Experimento 2.....	68
Figura 35: Sección dañada de forma intencional para crear una pieza con fuga de aceite. ....	69
Figura 36: Voltajes de salida de los grupos de Control y de Prueba durante 30 segundos.....	70
Figura 37: Distribuciones de voltajes de salida de los grupos de Control y de Prueba a diferentes tiempos. ....	73
Figura 38: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 5 segundos.....	75
Figura 39: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 10 segundos.....	76
Figura 40: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 15 segundos.....	77
Figura 41: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 20 segundos.....	78

Figura 42: Bosquejo inicial del cabezal de prueba para una eventual máquina de producción. ....79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costos aproximados de los sistemas de control de EMD. ....	10
Tabla 2. Taxonomía de confiabilidad de MEMS. ....	43
Tabla 3. Valores de voltaje de salida de las piezas a diferentes tiempos durante la prueba de fuga en el Experimento 3. ....	71

## GLOSARIO

**ASIC:** (Application Specific Integrated Circuit). Circuito electrónico fabricado para servir a una sola tarea.

**ECU:** (Engine Control Unit). Computadora que controla el comportamiento de un motor en cualquier vehículo fabricado en los últimos 10 años.

**EGR:** (Engine Gas Recirculation). Recirculación de los gases de escape hacia la cámara de combustión, una técnica de reducción de contaminantes en motores a diésel.

**EGR dP:** Sensor de diferencial de presión para sistemas de EGR.

**EMD:** (Emisiones de Motores a Diésel). Gases residuales producto de la combustión del diésel.

**GEI:** Gases de Efecto Invernadero.

**HDV:** (Heavy Duty Vehicles). Vehículos con dimensiones mucho mayores a los autos convencionales, con un peso de 6,000 libras o mayor y en general impulsados por motores a diésel.

**Hermeticidad:** Capacidad del Paquete para mantener las condiciones ambientales apropiadas alrededor del sensor durante la vida útil del producto.

**IA:** (Industria Automotriz). El conjunto de fabricantes -incluyendo las armadoras y sus proveedores- y distribuidores de vehículos motorizados en México y el mundo.

**Interfaz:** En manufactura de sensores, una interfaz es toda región donde dos materiales diferentes tienen contacto.

**MEMS:** (Micro-Electro Mechanical Systems). Dispositivos fabricados principalmente en Silicio, muy usados como sensores de estímulos físicos en otros dispositivos, como teléfonos, autos o televisores.

**NDT:** (Non Destructive Testing). Pruebas de confiabilidad de sensores que no afectan la funcionalidad a largo plazo de la pieza estudiada.

**NOx:** Óxidos de Nitrógeno. Uno de los principales contaminantes producto de la combustión del diésel, clasificados como gases de efecto invernadero y como cancerígenos.

**NTE:** (Not-to-Exceed limits). Límites establecidos para el control de emisiones en motores de combustión interna.

**Paquete:** Referente a fabricación de sensores, es toda la estructura que rodea al principal componente que mide una magnitud física.

**PPM:** (Partes por Millón). Escala muy utilizada en la Industria Automotriz para medir la proporción de fallas de vehículos en servicio.

**Pruebas de fuga:** Métodos usados para cuantificar la Hermeticidad de un del ensamble de un sensor.

**Puente de Wheatstone:** Arreglo de cuatro resistencias eléctricas con el cual puede determinarse un valor de voltaje sin necesidad de una referencia externa.

**RSW:** (Resistance Spot Welding). Método de soldadura donde dos metales se funden en un punto al paso de una corriente eléctrica.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

La industria manufacturera en México ha visto una expansión considerable en los últimos 20 años. En particular, la Industria Automotriz (IA) se encuentra ahora en el tercer lugar por el impacto económico, sólo por detrás de las industrias relacionadas con los productos del petróleo y otros productos químicos. La IA tiene más del 20% de la producción manufacturera en México y sus exportaciones crecen a un ritmo de alrededor del 10% anual. Por lo tanto, el gobierno mexicano ha declarado la IA como estratégica (Basurto Álvarez, 2013).

Dados sus productos con altos precios de consumo, la IA se caracteriza por requisitos estrictos sobre toda la cadena de valor en relación a costo y calidad (Contreras, Carrillo, & Alonso, 2012). Estos requisitos pueden crear situaciones en las que una sola falla del producto puede llevar a costos más de USD\$50,000 para un proveedor de partes de automóviles. Por lo tanto, garantizar la calidad (*Quality Assurance*, QA) es una parte vital de cualquier empresa dentro de una cadena de valor de la IA.

Parte de la IA es la producción de vehículos pesados (*Heavy Duty Vehicles*, HDV), que comprenden una amplia variedad de dentro y fuera de la carretera los vehículos (como camiones, remolques, tractores, autobuses y grúas), que pesan más de 3.500 Kg y son típicamente impulsados por motores a diésel. Este tipo de vehículos representan sólo alrededor de 5% de las unidades producidas por la IA, sin embargo, son una parte desproporcionada del consumo de combustible y gases de efecto invernadero (GEI), ya que son más pesados y suelen tener horarios de operación más largos que los automóviles regulares de pasajeros (Kodjak, Sharpe, & Delgado, 2015).

El hecho de que los HDV están disponibles en muchas configuraciones y usan motores a diésel crean un problema regulatorio intrincado (Kodjak et al., 2015). En particular, los motores diésel son una preocupación porque sus gases de escape

son una mezcla compleja de varios productos químicos como el dióxido de carbono, oxígeno, compuestos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos (Reşitoğlu, Altinişik, & Keskin, 2015; Twigg, 2007). A partir de la década de 1970, diferentes y cada vez más estrictos marcos normativos han sido establecidos en el mundo industrializado, con el aumento de la demanda en el control de emisiones, provocados en un principio por la evidencia encontrada de riesgo cancerígeno en la materia de escape de los motores a diésel (McClellan, Hesterberg, & Wall, 2012).

Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), clasificados como GEI, son parte de los gases de los escapes de diésel regulados por estas normas. Los  $\text{NO}_x$  crean ozono en la atmósfera, en combinación con la luz del sol y compuestos orgánicos volátiles (McClellan et al., 2012).

Con el fin de cumplir con las normas actuales y futuras, los fabricantes de HDV se han visto obligados a introducir cada vez más complejos procesos de control del motor que requieren varios sensores; estos bucles de control están bien sincronizados por medio de varios parámetros programados en la Unidad de Control del Motor (*Engine Control Unit* ECU) (Sarvi & Zevenhoven, 2010). La Recirculación de Gases de Escape (*Engine Gas Recirculation* EGR) es una de las tecnologías en uso para controlar la emisión de  $\text{NO}_x$  en estos sistemas (Knecht, 2008).

Una de las tecnologías más utilizadas hoy en día para la fabricación de sensores en la IA, como los usados para el control de emisiones en HDV, son los MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*, Sistemas Micro-Electro-Mecánicos) (Fujita, 1997; Wise, 1991). Los MEMS son dispositivos relativamente pequeños fabricados con muchas de las mismas tecnologías utilizadas en la producción de circuitos integrados (IC). Sin embargo, hay muchas diferencias significativas entre los IC y los MEMS, la principal es que los MEMS pueden contener partes móviles o elementos que responden a un estímulo mecánico o químico, además de señales eléctricas (Witvrouw, Tilmans, & De Wolf, 2004).

El objetivo de este proyecto es un procedimiento de prueba para un dispositivo MEMS ampliamente utilizado en motores diésel equipados con EGR, que es fabricado y probado en una línea de producción (LP), ubicada en México, y es objeto de requisitos estrictos de calidad, en un umbral de aceptación de <10 partes por millón (PPM) en cuanto a fallas con cliente.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el contexto de la IA, la calidad puede ser definida a través de tres parámetros (Hoyle, 2005):

1. Calidad del Diseño. ¿Qué tan bien el diseño se adapta a las necesidades y expectativas del usuario?
2. Calidad de Conformidad. ¿El diseño es aplicado correctamente en el producto manufacturado?
3. Calidad de Uso. ¿El usuario tiene confianza en el funcionamiento continuo del producto?

Estos factores son la base de las demandas de los ensambladores de vehículos sobre sus proveedores, y se reflejan en los estándares de calidad que debe ser respetados, principalmente ISO:TS16949 (Hoyle, 2005). Lo que suele ocurrir con cualquier vehículo es la siguiente: si la unidad falla dentro de unos meses de la compra, el usuario va a alejarse de la marca del vehículo, con nula preocupación por la causa raíz del problema. En el caso de los vehículos pesados, estas demandas sólo se ven exacerbadas, dado su alto costo y la naturaleza de sus funciones. Por lo tanto, los requisitos de calidad se conectan en cascada hacia abajo a partir del producto final (un HDV totalmente montado) a todos los subsistemas -como el motor- y toda la instrumentación dentro de esos subsistemas, de la que es parte el sensor MEMS estudiado en este proyecto.

Teniendo en cuenta el hecho de que los MEMS son relativamente pequeños – comúnmente menos de 20 mm<sup>3</sup>–, y que contienen partes móviles, son muy sensibles a descargas electrostáticas (Electrostatic Discharge ESD), corrosión por

humedad, oxidación y otros efectos abundantes en las aplicaciones en las que su uso es extenso (Chollet & Liu, 2016). Por lo tanto, los dispositivos MEMS implican un sensor MEMS en sí, por lo general fabricado en silicio, rodeada de elementos que le permiten interactuar con el mundo físico –con el propósito de medir estímulos como fuerza, presión, temperatura o flujo, para entregar una señal asociada con tal medición– sin ser destruidos. Estos elementos que rodean al sensor MEMS se conocen como el Paquete del dispositivo, y proporcionan una interfaz y una protección al sensor MEMS (van Driel, Yang, Yuan, van Kleef, & Zhang, 2007).

Para que un dispositivo MEMS sea utilizable a nivel industrial, la fiabilidad es una preocupación obvia. La fiabilidad de un dispositivo MEMS puede ser amenazada en tres niveles (van Driel et al., 2007):

1. El sensor MEMS en sí puede fallar. Ejemplos de ello son la fatiga mecánica y cambios en la respuesta inducidos por cargas electrostáticas.
2. El paquete puede fallar. Entre otras cosas: grietas inducidas por los cambios térmicos, debilitamiento de uniones provocado por condiciones ambientales fluctuantes y hermeticidad insuficiente.
3. El paquete puede afectar el rendimiento del sensor MEMS más allá de los niveles tolerables. Ejemplos son el estrés mecánico inducido por el paquete y la desgasificación, que conduce a un ambiente desfavorable para el funcionamiento del sensor.

Los requisitos de fiabilidad son bastante estrictos para todos los sistemas basados en MEMS (van Driel et al., 2007). En el caso particular del producto que se probará para este proyecto, la unidad debe sobrevivir por lo menos 20 mil millones de ciclos de presión, esto porque un tráiler típico puede viajar más de 16,000 Km por mes (Krishnamurthy, Carder, Thompson, & Gautam, 2007).

En cuanto al segundo tipo de falla mencionado arriba (falla del paquete): la Hermeticidad de un paquete en un dispositivo MEMS, es la capacidad de mantener las condiciones de la cavidad que prevalecen en el interior del paquete de forma adecuada después del empaquetado, en todo momento durante la

vida esperada del producto. Si la hermeticidad no se puede mantener, contaminantes como la humedad o gases ambientales ingresarán a la cavidad, lo que potencialmente puede crear un dispositivo inutilizable. Por lo tanto, una buena hermeticidad es parte esencial del rendimiento y la fiabilidad del producto (Han, 2012).

Por cavidad, Han se refiere el espacio donde el sensor MEMS está confinado dentro del paquete. La Figura 1 muestra el esquema de un sensor MEMS típico y su paquete, que ilustra una trayectoria de fuga de longitud  $l$ , que podría hacer fallar la hermeticidad del dispositivo.

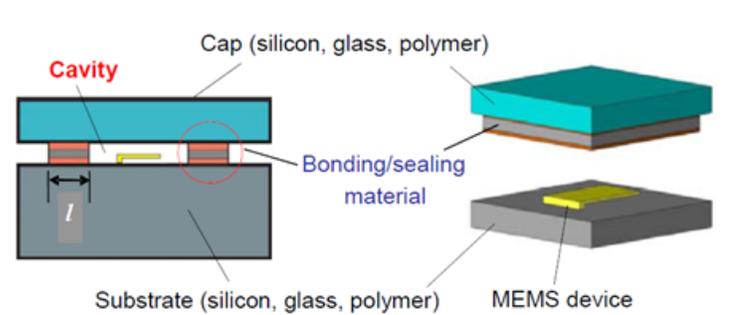


Figura 1. Esquemático de un paquete en un dispositivo MEMS  
Fuente: (Han, 2012)

El dispositivo a ser evaluado en este proyecto, que está actualmente en producción, presenta la cavidad del sensor MEMS (que tiene cuatro piezo-resistencias que crean un puente de Wheatstone, una estructura usada comúnmente en instrumentación (Ekelof, 2001; Ștefănescu, 2011)) evacuada a un cierto nivel de vacío (<80 Pa) e inmediatamente después la cavidad se llena con aceite de silicón, para luego ser sellada soldando por resistencia una esfera de acero en la entrada de la cavidad. El aceite a base de silicón tiene buenas propiedades térmicas y sirve como un medio para transmitir presión, una configuración que no es extraña en un sensor MEMS automotriz (Zongyang et al., 2010). El sensor MEMS se conecta a continuación a un circuito integrado de aplicación específica (Application Specific Integrated Circuit ASIC) (Hilbert, 1991) que acondiciona la salida del puente de Wheatstone. Como es común en la

industria (Dar, Suryanarayanan, & Geisberger, 2014), este dispositivo está expuesto a condiciones rigurosas de temperatura y presión, con el fin de calibrar la salida; sin embargo, actualmente una prueba de hermeticidad de la cavidad llena de aceite no se hace. Sólo un muestreo se realiza tratando de encontrar fallas en la configuración del proceso de soldadura; esta prueba no se puede extender al 100% de las piezas, ya que es destructiva.

Comúnmente, la hermeticidad de una cavidad sellada con soldadura por resistencia se mide con los procedimientos definidos en el estándar militar MIL-STD-883, que detalla la prueba de fugas gruesa y la prueba de fuga fina. En la prueba de fuga gruesa, se buscan burbujas al sumergir la unidad a probar (Unit Under Test, UUT) en fluorocarbono. En la prueba de fuga fina, la UUT es presurizada (o "bombardeada") con helio a alta presión (~3 bar) durante varias horas; si hay una fuga, el He entrará en la cavidad. A continuación, la UUT se transfiere a un espectrómetro de masas de He para medir la tasa de fuga (mejor conocida como leak rate en la IA) (De, Jourdain, De Moor, Tilmans, & Marchand, 2007).

Hay, sin embargo, inconvenientes con estos métodos. Existe amplia evidencia en la literatura que estos métodos de prueba de fuga tienen problemas con las pequeñas cavidades típicas de dispositivos MEMS: la prueba de fuga fina de He puede dar resultados falsos si el volumen de la cavidad es menor a  $10^{-3}$  cm<sup>3</sup> (Goswami & Han, 2008). Por lo tanto, varios métodos de pruebas de hermeticidad se han desarrollado y se aplican según las particularidades del paquete (Bo, De Coster, Simone, Wevers, & De Wolf, 2014).

Como parte de los estándares de fiabilidad que el sensor de la presión en este proyecto tiene que cumplir, la hermeticidad es uno de los más problemáticos para evaluar. Esto es porque la geometría del paquete hace difícil aplicar la presión en el sello de la cavidad, y el umbral de fuga aceptable aún no se ha definido. Cualquier intento de aplicar prueba de fuga con helio en este dispositivo sería destructivo. En todo caso, se requiere aplicar prueba de hermeticidad al 100% de las partes, de lo contrario un nivel de rechazo <10 PPM no se conseguirá. Sin

embargo, los estudios comparativos con una prueba de fuga fina de helio tendrán seguramente un lugar importante en el análisis experimental, ya que sus ventajas y limitaciones son bien entendidas (Costello, Desmulliez, & McCracken, 2012). Aún no está claro si los métodos en el uso para el descubrimiento de fugas en tubería para transporte de petróleo se pueden usar, o al menos sus modelos matemáticos (Beck, Bagshaw, & Yates, 2005) se pueden aplicar a este proyecto. Otros métodos de pruebas de hermeticidad serán explorados (H. Park, Choi, Park, & Kim, 2014), pero en este momento, su aplicación a este proyecto también es incierta.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto está enfocado a demostrar la viabilidad para realizar pruebas de hermeticidad no destructivas en sensores de presión, usados en motores a diésel y manufacturados en México, a fin de evitar fallas en campo de dichos sensores. Si el procedimiento de pruebas propuesto trabaja y se pone en práctica, las fallas potenciales se contendrán dentro de la planta de manufactura y se evitarán costos asociados a corregir problemas de calidad en motores que están sometidos a condiciones de trabajo mucho más intensas que los motores de automóviles para uso familiar.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo principal**

Construir un prototipo que demuestre la viabilidad de una prueba de hermeticidad al 100%, para un dispositivo de presión MEMS, que tiene una cámara llenada con aceite, y que se encuentra actualmente en producción en masa, sin efectos perjudiciales sobre la productividad o la calidad.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Establecer un umbral de aceptación de *leak rate* bien definido para el sello creado por soldadura por resistencia de la cavidad de aceite.
- Demostrar que hay correlación entre la presión medida por el sensor MEMS y el *leak rate* de helio, a través de los resultados experimentales.

- Establecer un método de prueba de fugas que se pueda utilizar en sensores de presión similares.

## **1.5 HIPÓTESIS**

Es posible definir una prueba de hermeticidad no destructiva para un dispositivo sensor de presión MEMS, con una cavidad llena con aceite de silicón, sin efectos perjudiciales sobre fiabilidad del dispositivo o el desempeño de la producción en una línea de manufactura para productos automotrices.

## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta un repaso de los fundamentos teóricos que respaldan esta investigación: la evolución de las regulaciones para las emisiones de motores a diésel, los controles necesarios para cumplir con dichas regulaciones, cómo es que el sensor objeto de este trabajo ayuda a esa tarea y porque es necesario implementar una prueba de hermeticidad para el sensor.

### 2.1 PROBLEMÁTICA DE LAS EMISIONES DE MOTORES A DIÉSEL

Las emisiones de escape de los motores a Diésel son, incluso a nivel empírico, notoriamente más densas que las de un motor a gasolina (Reşitoğlu et al., 2015). Aun cuando la necesidad de limitar las emisiones contaminantes de los motores a Diésel han ganado mayor notoriedad pública en los últimos años, gracias al caso de Volkswagen (VW) (Hui He, 2017), esta violación de normas involucró motores destinados a aplicaciones de vehículos ligeros en la IA. Las diferencias entre como los gobiernos juzgan el interés público en materia de emisiones contaminantes y los intereses económicos de los fabricantes de HDV se remontan a décadas más atrás, resaltando el impacto desproporcionado de estas máquinas en lo concerniente a emisiones, en particular NO<sub>x</sub>. En Octubre de 1998, el Departamento de Justicia (DOJ) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América iniciaron acción legal en contra de 7 fabricantes de motores para HDV (Kennedy, 1999) por USD\$84M, además de imponer mejoras tecnológicas obligatorias, estimadas en más de 1000 millones de dólares, por el uso de ajustes de software en los motores que llevaban a reportar emisiones más bajas en condiciones controladas de prueba; en aquel momento, se trataba de la multa más cara impuesta en materia ambiental en los Estados Unidos. En una clara muestra de lo problemático y esencial del papel regulatorio de los gobiernos, este acuerdo legal fue consecuencia de un problema prácticamente idéntico al identificado en los vehículos de VW.

Las consecuencias de no cumplir con las leyes establecidas en materia ambiental pueden fácilmente costar millones de dólares a los fabricantes de vehículos,

además de un considerable daño en su imagen pública (Hui He, 2017); por lo que las regulaciones representan uno de los principales motivadores para la innovación tecnológica en el área de control de emisiones (Haščič, 2009). Abajo se muestra un estimado del costo por vehículo, necesario para cumplir con las regulaciones de emisiones Diésel más recientes en Estados Unidos y en la Unión Europea (Blumberg, 2016); los fabricantes se evitarían todos estos costos en caso de que no estuvieran obligados a controlar las emisiones de escape, pero los gobiernos deben de considerar el daño colateral causado por la contaminación originada por los motores.

Tabla 1. Costos aproximados de los sistemas de control de EMD.

	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
<b>Hardware</b>				
<b>Air/fuel control and engine-out emissions</b>				
Fuel system—50% of total cost	\$376	—	\$38	\$41
VGT (extra cost)—50% of total cost	—	—	—	\$185
EGR system	—	\$439	—	—
EGR cooling	—	\$108	—	—
<i>Total for air/fuel control and engine-out emissions</i>	\$376	\$547	\$38	\$226
<b>Aftertreatment systems</b>				
DOC	—	\$498	—	—
DPF	—	—	—	\$1,398
SCR	—	\$2,386	\$422	\$364
<i>Total for aftertreatment systems</i>	—	\$2,884	\$422	\$1,762
<b>Total for hardware</b>	\$376	\$3,431	\$460	\$1,988
<b>OBD and sensors</b>	—	\$212	—	\$213
<b>R&amp;D</b>	\$50	\$128	—	\$79
<b>Incremental cost (compared to the previous standard)</b>	<b>\$426</b>	<b>\$3,771</b>	<b>\$460</b>	<b>\$2,280</b>
<b>Cumulative incremental cost (compared to Euro III)</b>	<b>\$426</b>	<b>\$4,197</b>	<b>\$4,657</b>	<b>\$6,937</b>

	US 1998	US 2004	US 2007	US 2010
<b>Hardware</b>				
<b>Air/fuel control and engine-out emissions</b>				
Fuel system—50% of total cost	—	\$376	\$38	\$41
VGT (extra cost)—50% of total cost	—	—	\$185	—
EGR system	—	\$439	—	—
EGR cooling	—	\$108	—	—
<i>Total for air/fuel control and engine-out emissions</i>	—	\$923	\$223	\$41
<b>Aftertreatment systems</b>				
DOC	—	\$498	—	—
DPF	—	—	\$1,398	—
SCR	—	—	—	\$3,172
<i>Total for aftertreatment systems</i>	—	\$498	\$1,398	\$3,172
<b>Total for hardware</b>	—	\$1,421	\$1,621	\$3,213
<b>OBD and sensors</b>	—	—	—	\$425
<b>R&amp;D</b>	\$50	—	\$29	\$178
<b>Incremental cost (compared to previous standard)</b>	<b>\$50</b>	<b>\$1,421</b>	<b>\$1,650</b>	<b>\$3,816</b>
<b>Cumulative incremental cost (compared to US 1998)</b>	<b>\$50</b>	<b>\$1,471</b>	<b>\$3,121</b>	<b>\$6,937</b>

Fuente: (Blumberg, 2016)

Para entender la complejidad asociada a elaborar, y cumplir, estándares de Emisiones de Motores a Diésel (EMD), es necesario revisar algunos detalles del funcionamiento de estos motores.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES A DIÉSEL

El motor a Diésel fue inventado por Rudolf Diesel en 1892, con patente DRP 67207 en Alemania para el “Método de Trabajo y Diseño de Motores de Combustión” (Mollenhauer & Tschöke, 2010). Obviamente, en aquel momento, el apellido de Diesel no había sido asociado a este tipo de motores. La patente original detalla una máquina que en teoría puede operar con cualquier fluido que pueda atomizarse y ser encendido después de una cierta temperatura ambiente, dentro de una cámara de combustión que sigue el ciclo de cuatro tiempos (Diesel, 1895), teorizado primero por el ingeniero francés Alphonse Beau de Rochas en 1862 y llevado exitosamente a la práctica por el ingeniero alemán Nikolaus Otto en 1876 (Mollenhauer & Tschöke, 2010). Más del 50% de los motores de CI, a gasolina y a diésel, funcionan en base a este método; la gran diferencia en el ciclo termodinámico de combustión viene en el tercer tiempo, como se describe a continuación (Mollenhauer & Tschöke, 2010) (con referencia a la figura 2).

1. Admisión. El aire (en azul claro en la figura), conforme el pistón baja, es arrastrado dentro del cilindro a través de la válvula de admisión (en verde), abierta en este paso del ciclo (Heywood, 2018; Mollenhauer & Tschöke, 2010).
2. Compresión. La válvula de admisión se cierra, el pistón comienza a moverse hacia arriba, y comprime la mezcla de aire, que se calienta al disminuir el volumen dentro de la cámara de combustión. El combustible, pulverizado, es inyectado dentro de la mezcla de aire caliente. Conforme el volumen disminuye, el aire continúa calentándose hasta alcanzar la temperatura de ignición del combustible (Heywood, 2018; Mollenhauer & Tschöke, 2010).
3. Expansión. Conforme se quema la mezcla de aire y combustible, ésta se expande y empuja el pistón hacia abajo. El pistón está mecánicamente conectado al cigüeñal (en rojo), que a su vez provee de movimiento a la máquina. En esta fase del ciclo es cuando se obtiene trabajo, y es donde la diferencia entre los motores a gasolina y a diésel radica: en los motores a gasolina, la mezcla de aire y combustible se enciende a través de un chispazo generado por una bujía; en los motores a diésel, el solo hecho de comprimir el gas provee la energía necesaria para encender la mezcla (Heywood, 2018; Mollenhauer & Tschöke, 2010).
4. Escape. La válvula de escape se abre, dejando salir los gases de escape (la parte de la mezcla de aire y combustible que no fue convertida en trabajo). Al llegar el pistón al final de su carrera ascendente, la válvula de escape se cierra, la válvula de admisión se abre y el ciclo comienza de nuevo (Heywood, 2018; Mollenhauer & Tschöke, 2010).

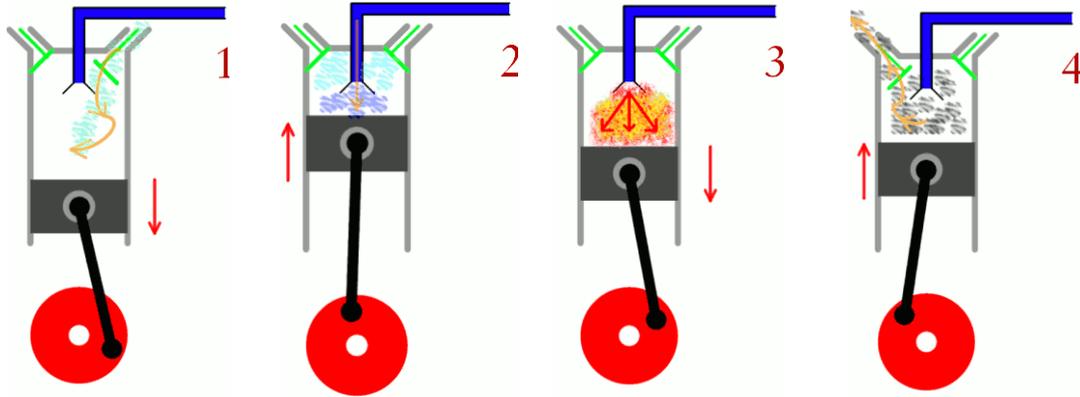


Figura 2: Ciclo de cuatro tiempos en los motores de combustión interna.  
Fuente: (J. Smith, 2016)

A pesar de haber sido inventado en el siglo XIX, la totalidad del proceso químico de combustión en un motor a diésel, y los posibles efectos en la salud provocados por sus residuos, no fue entendida sino hasta principios de la década de 1990 (McClellan et al., 2012). Para concebir las dificultades asociadas a controlar las EMD, es necesario revisar de manera somera el complejo proceso termodinámico que transforma la energía almacenada en el combustible en trabajo, con la inevitable generación de elementos sobrantes en las reacciones químicas.

Cuando se analiza a detalle el ciclo de cuatro tiempos, frecuentemente se citan varios parámetros mecánicos y termodinámicos (Mollenhauer & Tschöke, 2010).

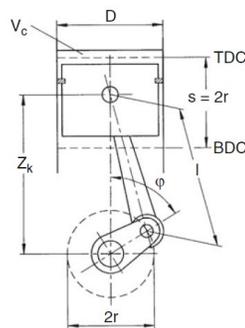


Figura 3: Esquemático de las partes mecánicas de un cilindro.  
Fuente: (Mollenhauer & Tschöke, 2010)

Con referencia a la Figura 3:

*TDC (Top Dead Centre – Punto Muerto Superior)*. Es el nivel de la carrera del pistón donde se encuentra más cerca de la cubierta del cilindro, cambia el sentido de la marcha y su velocidad es nula.

*BDC (Bottom Dead Centre – Punto Muerto Inferior)*. El nivel mínimo de la carrera del pistón.

*D*. Diámetro de las paredes interiores del cilindro.

*r*. Radio de la manivela del cigüeñal.

*s*. Longitud del volumen desplazado en la carrera del cilindro, como la figura lo marca, este es 2 veces el radio de la manivela.

$\varphi$ . (*Crank Angle – CA*). Desplazamiento angular de la manivela con respecto al TDC.

$V_c$ . Volumen contenido entre el TDC y la parte superior del cilindro, necesario para la introducción del combustible y consecuente ignición con la mezcla de aire. Es el volumen mínimo en la cámara de combustión.

$V_h$ . Volumen contenido en el desplazamiento del cilindro.

$\varepsilon$ . Relación de Compresión (*Compression Ratio*). Es el volumen de aire desplazado en el ciclo anterior, más el volumen de la cámara de combustión entre el volumen mínimo de la cámara de combustión, expresado como:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 s + V_c}{V_c} \quad (1)$$

Al final del tiempo de expansión, inicia uno de los procesos fundamentales para completar la combustión, la fase de intercambio de gases (Gas Exchange) (Kocher et al., 2011), que cumple dos tareas:

- Reemplazar la carga de aire utilizada (escape) con aire “fresco”.
- Disipar el calor generado por el ciclo termodinámico.

El intercambio de gases puede ser caracterizado a través de una serie de parámetros adimensionales:

$m_Z$ . Masa total del gas ya utilizado por la combustión en el cilindro al final del intercambio de gas.

$m_L$ . Masa total de gas que fluye dentro del cilindro a través de la válvula de admisión.

$m_{LZ}$ . Masa de aire fresco en el cilindro al final del intercambio de gases.

$m_{RG}$ . Masa de gas residual de escape (es decir, del ciclo anterior) dentro del cilindro al final del intercambio de gases.

$$m_{RG} = m_Z - m_{LZ} \quad (2)$$

$\rho_L$ . Densidad del aire previo a la introducción en el cilindro.

$m_{Ltheor}$ . Masa teórica de aire, correspondiente a la masa de aire con densidad  $\rho_L$ , introducida en el cilindro para llenar el volumen desplazado  $V_h$ .

$$m_{Ltheor} = \rho_L \cdot V_h \quad (3)$$

$\lambda_a$ . Eficiencia en el uso de aire. Cantidad total de aire relativa a la masa de aire teórica que fluye dentro del cilindro durante el intercambio de gases.

$$\lambda_a = \frac{m_L}{m_{Ltheor}} \quad (4)$$

Aun cuando, en teoría, la combustión del diésel solo debería originar CO y H<sub>2</sub>O como residuos, la multitud de variables que tienen lugar en el ciclo de cuatro

tiempos altera el balance de forma considerable (Mann, 1998; Mollenhauer & Tschöke, 2010). Entre los principales factores que afectan el resultado final del proceso químico están:

- Una cámara de combustión de volumen, y por lo tanto temperatura, variables.
- La velocidad del ciclo, con tiempos que se miden en escalas de  $\mu\text{s}$ , lo que obliga a tener estados termodinámicos en su mayoría transitorios, desde el punto de vista matemático.
- El hecho de tener una mezcla de aire - combustible heterogénea en su distribución al momento de encenderse.

En química, combustión es la oxidación de las moléculas de un combustible por medio de oxígeno atmosférico como oxidante. Por lo tanto, la masa total transformable  $m_b$  está limitada por la masa de aire presente dentro del cilindro. Sea la cantidad estequiométrica de aire requerido para una combustión completa  $L_{min}$  [kg aire / kg combustible], y sea el coeficiente aire/combustible  $\lambda_v$ , que especifica la relación entre "cantidad requerida por cantidad demandada" por el proceso de combustión (Mollenhauer & Tschöke, 2010):

$$\lambda_v = m_{LZ} / (m_B \cdot L_{min}) \quad (5)$$

Donde lo siguiente aplica para  $m_{LZ}$ , que es el "abastecimiento" de masa de aire hacia todos los cilindros ( $V_z = z \cdot V_c$ ) del motor:

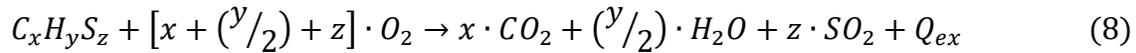
$$m_{LZ} = V_z \cdot \rho_z = \lambda_l \cdot \rho_L \cdot V_H \quad (6)$$

Dado que la densidad  $\rho_z$  de la mezcla de combustible por carga es en casi todo tiempo desconocida, la definición de la eficiencia volumétrica  $\lambda_l$  y la densidad  $\rho_L$  de la carga directamente inyectada en el cilindro se expresan como:

$$\rho_L = p_L / (R_L \cdot T_L) \quad (7)$$

El requerimiento de aire queda finalmente determinado por el análisis de los elementos en el combustible. El diésel es un derivado del petróleo, un

conglomerado de hidrocarburos que consiste principalmente de carbón (C), hidrógeno (H) y azufre (S) con proporciones muy pequeñas de oxígeno (O) y Nitrógeno (N). Por lo tanto, la ecuación balanceada de la oxidación completa de una molécula genérica de diésel  $C_xH_yS_z$  en dióxido de carbono  $CO_2$ , agua  $H_2O$  y dióxido de azufre  $SO_2$  es como sigue:



El balance de esta ecuación proporciona la cantidad estequiométrica de aire requerido para una combustión completa  $L_{min}$ , correspondiente a la cantidad de oxígeno y el número de moles:

$$L_{min} = 11.48 \cdot (c + 2.98 \cdot h) + 4.3 \cdot s - 4.31 \cdot o \quad [kg/kg] \quad (9)$$

Donde  $c$ ,  $h$ ,  $s$ ,  $o$  son las fracciones respectivas de los elementos C, H, S, O en el análisis. El calor  $Q_{ex}$  que se libera durante la combustión está correlacionado con el valor calorífico  $H_u$  del combustible usado, que también puede calcularse como:

$$H_u = 35.2 \cdot c + 94.2 \cdot h + 10.5 \cdot (s - o) \quad [MJ/kg] \quad (10)$$

La siguiente aproximación se basa en la densidad  $\rho_B$  del combustible a 15°C:

$$H_u = 46.22 - 9.13 \cdot \rho_B^2 + 3.68\rho_B \quad [MJ/kg] \quad (11)$$

Por lo tanto, la siguiente relación es válida para el calor proporcionado al ciclo de combustión por "combustión interna":

$$E_B = Q_{zu} \leq m_B \cdot H_u \quad (12)$$

Es decir, la energía proporcionada al motor es equivalente al calor liberado en la reacción de combustión dentro de los pistones, y no puede ser mayor al producto

de la masa total transformable de combustible por el calor específico del combustible (Mollenhauer & Tschöke, 2010).

Como se ha dicho, este intercambio de energía viene fuertemente influenciado por los estados transitorios en el ciclo de cuatro tiempos. En teoría, un intercambio completo de gases se lleva una revolución del cigüeñal. De acuerdo a la premisa resumida arriba del ciclo termodinámico teórico en el motor, los elementos que facilitan el intercambio de gases (las válvulas) deberían de abrirse y cerrarse de forma instantánea, y llevar un balanceo de forma rectangular. Sin embargo, las válvulas en un motor real solo pueden abrirse y cerrarse de forma gradual, debido a efectos de aceleración y pérdidas inevitables de energía asociadas a la geometría necesaria para una circulación adecuada de los gases (Mollenhauer & Tschöke, 2010; J. Smith, 2016). Así, el desplazamiento real de las válvulas en un ciclo de cuatro tiempos, respecto al desplazamiento angular  $\varphi$ , puede observarse esquemáticamente en la siguiente figura:

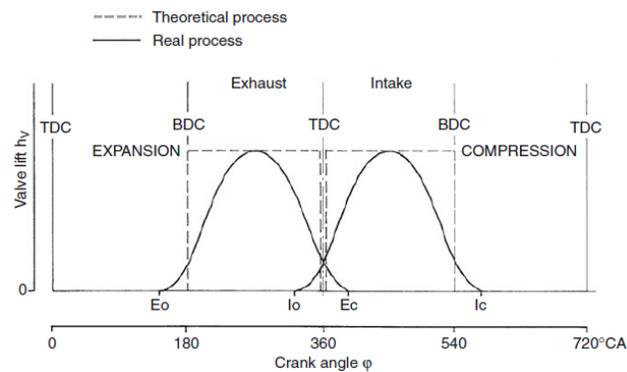


Figura 4: Desplazamiento lineal de las válvulas con respecto al desplazamiento angular del cigüeñal.

Fuente: (Mollenhauer & Tschöke, 2010)

Donde:

$E_o$ : Apertura de la válvula de escape.

$E_c$ : Cierre de la válvula de escape.

$I_o$ : Apertura de la válvula de admisión.

$I_c$ : Cierre de la válvula de admisión.

$H_v$ : Desplazamiento lineal de las válvulas.

Las dos curvas representan el movimiento relativo de las válvulas con respecto al giro del cigüeñal, en claro contraste con el ciclo "ideal" de una apertura y cierre instantáneos (líneas punteadas en la figura). La apertura gradual de las válvulas, y su forma, son dos de los factores que tienen influencia en la distribución de la mezcla de aire-combustible  $\lambda$  dentro del cilindro, que afecta directamente la formación de residuos durante el proceso de combustión.

Otro factor a considerar es la inyección del combustible, que comienza justo antes del inicio del paso de compresión (Kökkülünk, Gonca, & Parlak, 2014). El combustible se inyecta en forma pulverizada, para facilitar la absorción de energía (calor) acumulada por el proceso de compresión del gas dentro del cilindro. Para que esta reacción tenga lugar se necesita un combustible con una alta temperatura de auto-ignición (la temperatura para que un combustible arda espontáneamente a presión atmosférica); que en el caso del diésel es arriba de los 210°C. Dicha temperatura se logra con razones de compresión en el rango de ( $12 < \varepsilon < 21$ ), lo que equivale a presiones internas en el rango de (160 bar – 230 bar). El proceso de inyección produce de forma inevitable una distribución heterogénea del combustible, es decir, diferentes gradientes de  $\lambda$ . Mientras que en el núcleo del chorro de combustible inyectado prácticamente no hay oxígeno ( $\lambda \cong 0$ ), también existen zonas dentro de la cámara de combustión que contienen solo aire ( $\lambda \rightarrow \infty$ ). Hay diferentes concentraciones de aire – combustible, dentro de estos extremos, en la cámara de combustión durante el proceso de inyección. En términos prácticos es imposible la utilización total del aire en una mezcla heterogénea. La no uniformidad de  $\lambda$  dentro de la cámara de combustión tiene un efecto directo en las temperaturas alcanzadas en la etapa de expansión. Estos dos factores originan forzosamente residuos no predichos en el modelo ideal de intercambio de energía descrito anteriormente.

La figura 5 muestra a la izquierda un esquemático de la inyección de combustible, con las válvulas (en verde) cerradas y el inyector (en morado) al centro de la tapa del cilindro. Como lo ilustra la representación de la llama en la figura, la distribución del calor cuando el combustible se quema no es uniforme. A la derecha se muestra

un esquemático de las zonas de diferente temperatura con respecto a la posición del inyector. Las temperaturas más altas se dan en las zonas más externas del combustible inyectado, donde  $\lambda \rightarrow \infty$ , mientras que las temperaturas más bajas ocurren en la parte más interna del chorro, donde  $\lambda \rightarrow 0$ . La parte más caliente de la flama y con relativo exceso de aire es donde se generan los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Fuera de la zona externa de la flama las temperaturas de combustión son tan bajas que el combustible no puede oxidarse por completo, esta es la fuente de hidrocarburos no quemados (HC) en la mezcla de gases de escape. Las partículas de hollín (soot en la figura), y monóxido de carbono (CO) como su precursor, se forman en las zonas con relativamente escaso aire en la parte más interna del chorro de combustible.

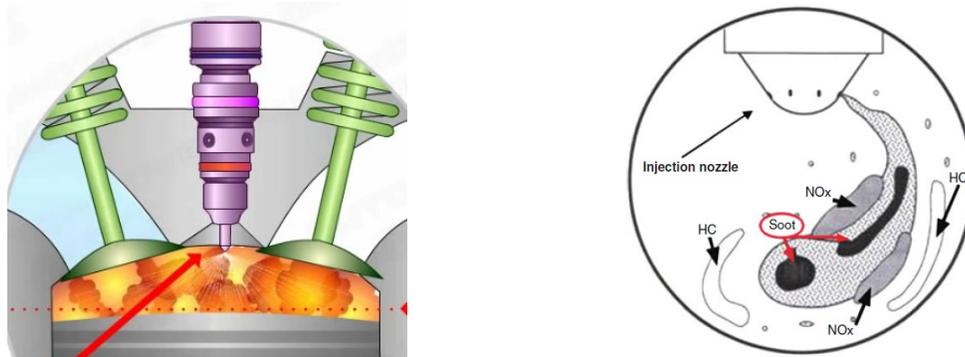


Figura 5: Representación gráfica de la ignición del combustible.  
 Fuentes: ("How Diesel Engines Work - Part - 2 (Stages of Combustion) - YouTube," 2018;  
 Mollenhauer & Tschöke, 2010)

## 2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL DE EMISIONES EN MOTORES A DIÉSEL

Las técnicas de control de EMD incluyen entonces dos aproximaciones: una interna en la cámara de combustión (optimizar la mezcla de aire – combustible para hacerla llegar a un punto "balanceado", usar un rango de compresión relativamente alto, y buscar mantener un rango controlado de temperatura) y otra externa, después del proceso de combustión, al filtrar o descomponer químicamente los gases de escape. Sin embargo, ninguna de estas soluciones es

una panacea, y múltiples métodos son usadas en cada HDV al mismo tiempo, o de otra forma no se lograría cumplir con los requerimientos cada vez más exigentes de los estándares para controlar las EMD (Eckerle, 2017). Además, en general una nueva tecnología desarrollada para cumplir con el más reciente estándar tiende a ser implementada en tándem con las técnicas ya establecidas, debido al complicado balance que se debe lograr para mantener las emisiones en un determinado rango. En la figura de abajo se ilustra lo difícil que puede ser esta tarea. El eje vertical es  $1/\lambda$ , es decir, entre más aumenta ese número existe mayor cantidad de combustible con respecto al aire, y el eje horizontal es temperatura en grados kelvin [°K]. Dependiendo de la potencia demandada del motor, los sistemas de control de EMD tratan de mantener la operación en una región relativamente pequeña, en verde en la figura, con el evidente objetivo de minimizar tanto la generación de hollín como de  $\text{NO}_x$ . La zona señalada en verde es el ideal donde se desea que el motor opere, pero como se ha visto, es imposible evitar que el proceso termodinámico oscile en prácticamente todos los puntos de la gráfica cuando se tiene una mezcla heterogénea en la cámara de combustión (Twigg, 2007), de ahí que los sistemas de control de emisiones externos a la operación del cilindro sean indispensables.

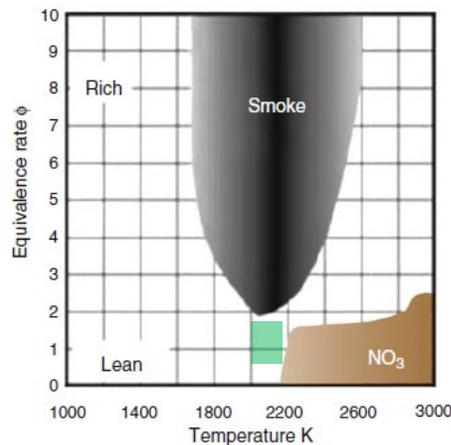


Figura 6: Zonas de generación de contaminantes como función de la temperatura y el inverso de la mezcla de aire.

Fuente: (Mollenhauer & Tschöke, 2010)

El completo entendimiento de los procesos que llevan a la generación de contaminantes ilustrados arriba en la combustión, y sus principales variables, es indispensable para establecer estándares de EMD que sean prácticos en su implementación. Los estándares para regular emisiones de los vehículos de combustión interna se comenzaron a crear en California en 1959 (ECOPoint, 2018), inicialmente para controlar las cantidades originadas de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO), en los motores a gasolina. Aun cuando los autos con motores a gasolina han incorporado convertidores catalíticos desde los años 70, no fue sino hasta 2004 (Blumberg, 2016) que un equivalente en los HDV (DOC, *Diesel Oxidation Catalysts*) fue requerido por Ley. Actualmente, las emisiones de motores de combustión interna son reguladas en decenas de países, incluyendo Estados Unidos, la Unión Europea, Canadá, Japón, Corea del Sur, Turquía, México, India y China. La vanguardia en las regulaciones de emisiones de motores de CI siempre ha sido llevada en Estados Unidos y la Unión Europea; a partir de las actualizaciones conocidas como US 2010 y Euro VI, estas dos regiones se encuentran a un nivel prácticamente equivalente en su marco regulatorio, permitiendo emisiones de NO<sub>x</sub> y PM en cantidades 10 veces más bajas que en el año 2000 (Blumberg, 2016). Sin embargo, tratándose de las EMD, históricamente las regulaciones en los Estados Unidos han sido más estrictas, y más exitosas, que en la Unión Europea (Nesbit, Fergusson, & Colsa, 2016), principalmente debido a una tendencia a favorecer a los fabricantes de vehículos Diésel en las economías más grandes de Europa (Hooftman, Messagie, Van Mierlo, & Coosemans, 2018).

A los fabricantes de motores a diésel les gusta resaltar el hecho que se ilustra en la figura 7: en términos relativos, las EMD son menos contaminantes que las emisiones de un motor a gasolina (Mollenhauer & Tschöke, 2010), sin embargo, esta comparación por sí misma no ilustra lo complejo del problema (que involucra componentes únicos en las EMD), y la forma de operar de los HDV, mucho más demandante en términos de consumo de energía que los vehículos típicamente impulsados por motores a gasolina.

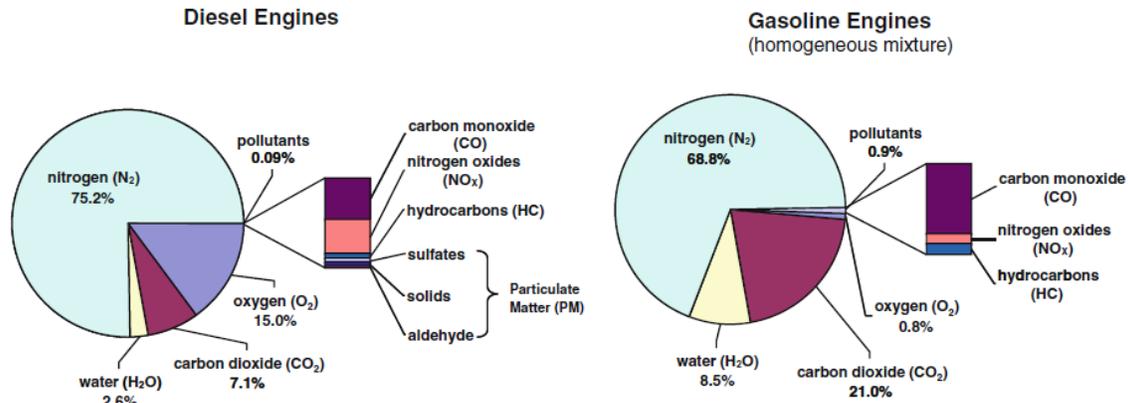


Figura 7: Componentes de las emisiones en motores a diésel y gasolina, en porcentaje.  
Fuente: (Mollenhauer & Tschöke, 2010)

Considerando entonces las particularidades de los HDV, las EMD que son reguladas se pueden clasificar como sigue (ECOPoint, 2018):

- Residuos sólidos muy pequeños (Diesel Particulate Matter – PM). Mejor conocido como hollín. Se miden a través de métodos gravimétricos (masa) u ópticos (opacidad).
- Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Principalmente NO y NO<sub>2</sub>. Gases como el N<sub>2</sub>O no están incluidos en las normas.
- Hidrocarburos (HC). Regulados como emisiones totales de hidrocarburos (Total Hydrocarbon Emissions – THC) o como hidrocarburos sin metano (Non-Methane Hydrocarbons – NMHC). En ocasiones se usa un métrico combinado de HC + NO<sub>x</sub>.
- Monóxido de Carbono (CO).

Para toda esta gama de residuos se establecen umbrales de no-traspaso (*Not-to-Exceed limits* – NTE), dentro de un rango conocido de operación del motor (Krishnamurthy et al., 2007). Dada la naturaleza transitoria del ciclo termodinámico en los motores de CI, no es posible establecer una meta constante para la cantidad de emisiones, luego entonces la referencia se da en base a los parámetros que expresan la energía demandada del motor. La figura de abajo ilustra una de estas zonas de operación como función de la velocidad y torque del motor.

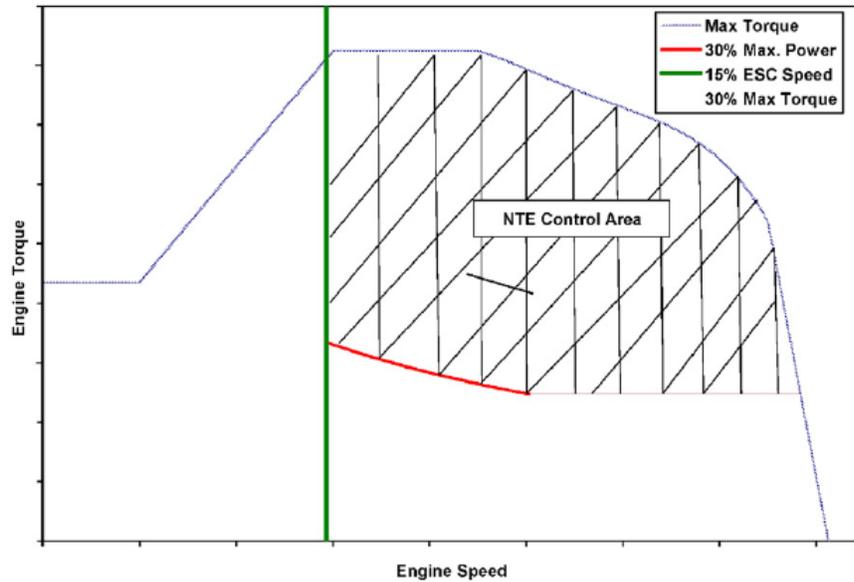


Figura 8: Grafico de zonas de no traspaso como función de la velocidad y torque del motor.

Fuente: (Krishnamurthy et al., 2007)

Conforme las regulaciones han evolucionado, los NTE se han hecho más amplios y sus tolerancias se han reducido. En Europa las regulaciones para EMD son conocidas como Euro-I, Euro-II, hasta llegar a la regulación más reciente, la Euro-VI. La autoridad que se encarga de emitir las políticas y decidir los parámetros en las regulaciones de EMD es la Comisión Europea. Debido a las características de la Unión Europea (con múltiples países e intereses), las legislaciones en materia de emisiones contaminantes han sido fuertemente influenciadas por los intereses de las economías más grandes. La introducción de estándares para regular la fabricación de motores de combustión interna comenzó en la década de 1970, pero se centraba en problemas de homologación de políticas económicas relacionadas con los combustibles. No fue sino hasta 1992 que un marco coherente surgió a partir de la Euro I, que introdujo límites a las emisiones de  $\text{NO}_x$  y se comenzó a ocupar de problemas ambientales, como la acidificación (el incremento del pH en los océanos debido al incremento de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera (Reşitoğlu et al., 2015)). La consecuencia obvia de la introducción de Euro I fue la adopción en masa de los convertidores catalíticos en la primera mitad de los años 1990 (ECOPoint, 2018; Nesbit et al., 2016).

En contraste, los convertidores catalíticos ya eran comunes en Estados Unidos en 1990. La EPA tiene amplia autoridad en Estados Unidos para emitir marcos regulatorios, sin embargo estas normas conviven en paralelo con los estándares más estrictos a nivel estatal emitidos por California, y que son seguidos por una docena de otros estados (Hui He, 2017). La regulación enfocada a controlar las emisiones contaminantes en Estados Unidos comenzó a nivel federal en la década de 1970, con el paso de un agregado a la Ley que regula las emisiones contaminantes (*Clean Clear Act*), que solo incluía las emisiones de vehículos ligeros. Esta regulación introdujo el uso del convertidor catalítico e impuso la reducción del 90% de emisiones contaminantes de automóviles para 1975. Las regulaciones enfocadas a los HDV se comenzaron a emitir en la década de 1980 (ECOPoint, 2018; Nesbit et al., 2016).

A pesar de la evolución dispareja de las regulaciones en Europa y en Estados Unidos, se ha llegado a un punto en que sus metas, desde el punto de vista de las EMD, convergen en la práctica. Las tablas de abajo muestran una clara tendencia en el endurecimiento de las normas a ambos lados del Atlántico:

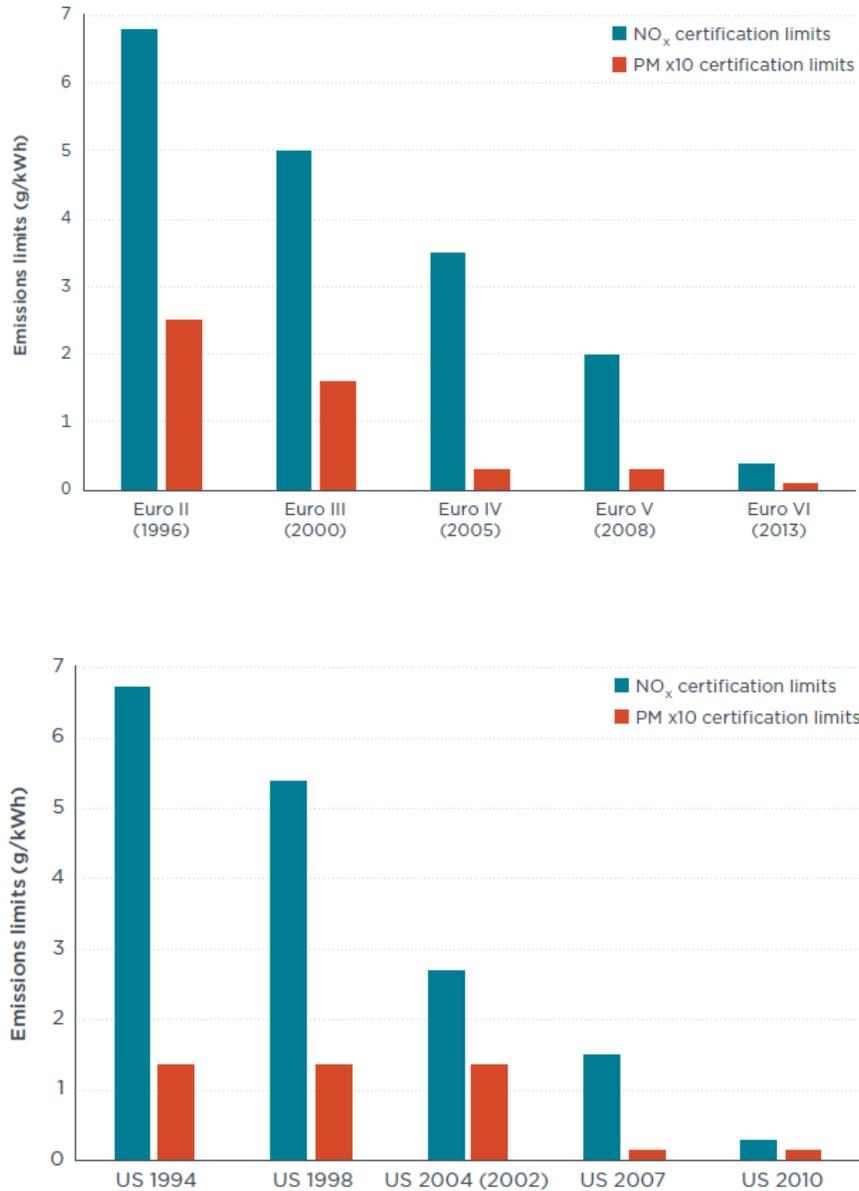


Figura 9. Metas de para control de emisiones en Europa y Estados Unidos.  
Fuente: (Blumberg, 2016)

La clara definición de las políticas regulatorias en Europa y Estados Unidos ha establecido modelos que, con muy pocas adaptaciones, se han estado introduciendo en el resto del mundo. Abajo se muestra un condensado de la adopción esperada de los estándares en los principales mercados de HDV, donde los colores resaltan la equivalencia con los estándares europeos:

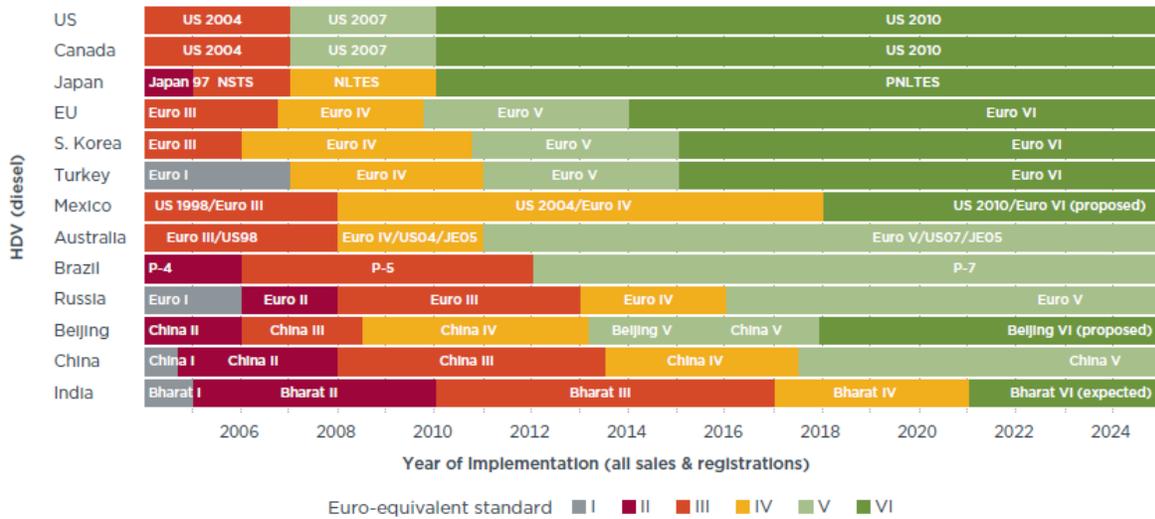


Figura 10. Cronograma de implementación de normas regulatorias.  
Fuente: (Blumberg, 2016)

Basándose en los estándares de la EPA, y para ilustrar la complejidad inherente en los controles necesarios, un evento a considerarse en NTE ocurre cuando todas las condiciones listadas a continuación se cumplen (Krishnamurthy et al., 2007):

- La velocidad del motor esta por lo menos 15% arriba de la velocidad en neutro.
- El torque proporcionado por el motor es por lo menos 30% del torque teórico de la máquina.
- La potencia del motor es 30% o mayor que la potencia máxima estipulada.
- La altitud a la que se encuentra el vehículo es máximo 5500 ft (1676 m).
- La temperatura ambiente debe ser menor o igual a 100°F (37.8°C) a nivel del mar, o máximo 86°F (30°C) a 5500 ft.
- El consumo de combustible necesario para entregar una determinada potencia (*Brake Specific Fuel Consumption – BSFC*) debe ser 105% del mínimo BSFC si es que el motor no está acoplado a una transmisión automática.
- La zona de operación del motor está fuera de alguna excepción concesionada al fabricante del motor.
- La zona en cuestión consume en teoría más del 5% de operación del motor.

- Para los motores equipados con EGR, la temperatura del múltiple de admisión (la parte del motor que proporciona la mezcla de aire – combustible a los cilindros) debe estar arriba de un rango de (86°F - 100°F), dependiendo de la presión en el múltiple.
- Para los motores equipados con EGR, la temperatura del anticongelante debe estar arriba de un rango de (125°F - 140°F), dependiendo de la presión en el múltiple de admisión.
- La temperatura en el sistema de tratamiento de gases post-combustión debe ser mayor o igual a 250°C.

Otro factor a considerar es la mezcla de combustible usado: se ha demostrado que la composición química de los combustibles es una variable crítica en la calibración de los sistemas de control de emisiones (Mann, 1998).

Finalmente, los efectos del uso continuo, típico en los HDV, deberían ser considerados en las regulaciones. En los sistemas a diésel, los problemas de acumulación de hollín y corrosión son especialmente agudos (Zhan, 2009). Este último factor apenas empieza a ser investigado, con evidencia experimental limitada (Ntziachristos, Papadimitriou, Ligterink, & Hausberger, 2016), por lo tanto no figura aun en los estándares.

Las estrategias para cumplir con los estándares regulatorios de EMD descritos arriba pueden englobarse en dos áreas, que pudieran ser llamadas de prevención (controlando el propio ciclo de combustión) y de bloqueo (procesando químicamente los gases antes de que salgan hacia la atmosfera por el escape) (Nesbit et al., 2016).

Los controles dentro de la cámara de combustión, ya usados en los HDV, incluyen (Blumberg, 2016):

- Sistemas de inyección de combustible. La presión, gasto y temporización del flujo de combustible se usan para controlar tanto los NO<sub>x</sub> como las PM. Una presión de inyección alta reduce el tamaño de las partículas de

combustible que entran al cilindro y mejora la penetración del combustible dentro del cilindro, con lo que la mezcla aire– combustible es más homogénea. Los sistemas electrónicos de combustión permiten un dosificado preciso y múltiples eventos de inyección en el mismo ciclo de cuatro tiempos.

- Sistemas de optimización de flujo de aire. Deben de controlar el movimiento, temperatura y presión del aire que entra en la cámara de combustión, asegurarse de que está relativamente limpio y contiene suficiente oxígeno para una combustión lo más completa posible. La necesidad de estos sistemas hace a los motores a diésel particularmente atractivos para la implementación de turbo cargadores.
- Sistemas de Recirculación de Gases de Escape (EGR – *Exhaust Gas Recirculation*). Un EGR desvía parte de los gases de escape de vuelta hacia la cámara de combustión. Esto permite introducir un diluyente en el proceso, que disminuye las temperaturas máximas dentro del cilindro y por lo tanto la generación de NO<sub>x</sub>. Esta retroalimentación debe ser limitada, dados sus efectos secundarios (Kökkülünk et al., 2014; Krishnamurthy et al., 2007; Zhan, 2009), que se detallan más abajo. En general, los EGR buscan llevar la temperatura dentro de la cámara de combustión a un rango donde sea difícil la generación tanto de NO<sub>x</sub> como de PM, y deben ser calibrados en conjunto con los otros componentes de control. La influencia de un EGR puede ser ilustrada con la siguiente figura, obtenida a través de una simulación del ciclo de combustión, donde la primera rejilla muestra la temperatura con EGR, y la segunda con un EGR considerado en el sistema. De forma similar a la figura 5, aquí se muestra que el EGR busca ampliar el área de operación optima, donde se pueda tener la menor cantidad de NO<sub>x</sub>, PM y HC al mismo tiempo (señalada con las dos flechas en la segunda grafica) (Krishnamurthy et al., 2007):

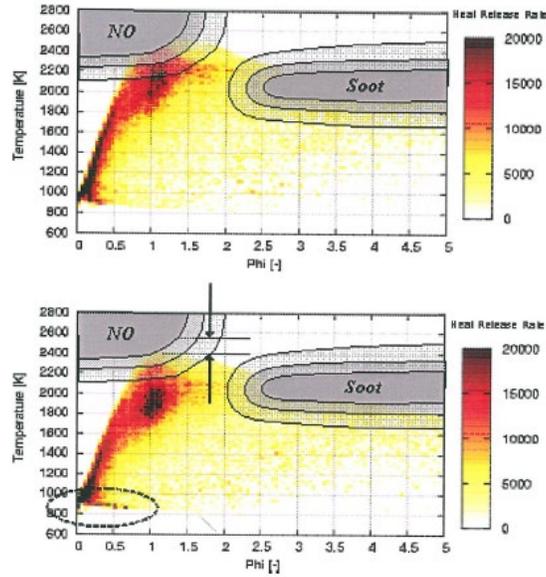


Figura 11: Zonas de generación de contaminantes con y sin EGR.  
Fuente: (Knecht, 2008)

Por otra parte, los sistemas que operan después del proceso de combustión (*aftertreatment*), incluyen (Blumberg, 2016):

- Reducción Catalítica Selectiva (SCR – *Selective Catalytic Reduction*). Los sistemas SCR introducen amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) para provocar una reacción química con los  $\text{NO}_x$  sobre un catalizador, dejando como residuos nitrógeno y agua. Pueden operar en un rango relativamente amplio de temperatura ( $150^\circ\text{C} - 450^\circ\text{C}$ ), y permiten al motor trabajar en rangos de potencia más altos (que generan más  $\text{NO}_x$ ). También permiten reducir el tamaño promedio de las PM. Los catalizadores normalmente usados son vanadio o zeolita. En la mayoría de los casos, el amoníaco se genera por la descomposición de una solución de urea, que se introduce en el flujo de escape antes del catalizador. Esta solución de urea debe ser recargada periódicamente. Estos sistemas deben tomar precauciones para que la solución no se congele, lo que ocurre típicamente a  $-11^\circ\text{C}$ . También se debe prevenir un exceso de emisiones de amoníaco, comúnmente mediante el uso de un Catalizador en Línea de Amoníaco (ASC – *Ammonia Slip Catalyst*).
- Catalizadores por oxidación de Diésel (DOC – *Diesel Oxidation Catalysts*). Un DOC oxida los HC, el CO y la fracción orgánica de las PM. En un motor a

diésel típico, la presencia en exceso de oxígeno permite una eficiencia alta de los DOC. Estos sistemas no tienen un impacto mayor al 25% en la reducción de PM, y requieren concentraciones de compuestos de azufre menores a 500 ppm en el diésel usado por el motor.

- Filtros de partículas de Diésel (DFP – *Diesel Particulate Filters*). Los DFP atrapan físicamente la parte de compuestos de carbono presentes en las PM. En general usan un sustrato cerámico por el que se conduce el gas de escape, y logran una eficiencia cercana al 95% en la reducción de cantidad de partículas, dada la facilidad con la que atrapan partículas sólidas. Se debe dar un proceso de regeneración, para remover las PM acumuladas, que puede ser pasivo o activo. La regeneración pasiva quema el material depositado usando dióxido de nitrógeno como oxidante. La regeneración activa requiere de la inyección de combustible directamente antes del DFP para lograr quemar los residuos.

Todos estos sistemas de tratamiento post-combustión ya están en uso en los HDV que cumplen con Euro VI y US 2010, con un arreglo típico como el que se muestra en la figura:

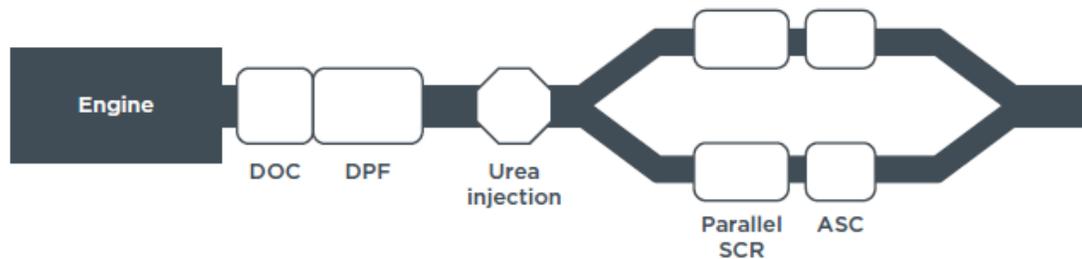


Figura 12: Esquemático de los controles de EMD posteriores a la combustión en un motor que cumple tanto con US 2010 como con Euro VI.

Fuente: (Blumberg, 2016)

## 2.4 DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN DEL SENSOR OBJETO DE ESTE ESTUDIO

El sensor objeto de estudio de este trabajo es un transductor de diferencial de presión que está localizado en el sistema de EGR en los HDV, referido en adelante como EGR dP. Abajo se muestra un esquemático de los elementos necesarios para

el control de la operación de un sistema de suministro de aire en los cilindros de un motor a diésel, incluyendo el EGR:

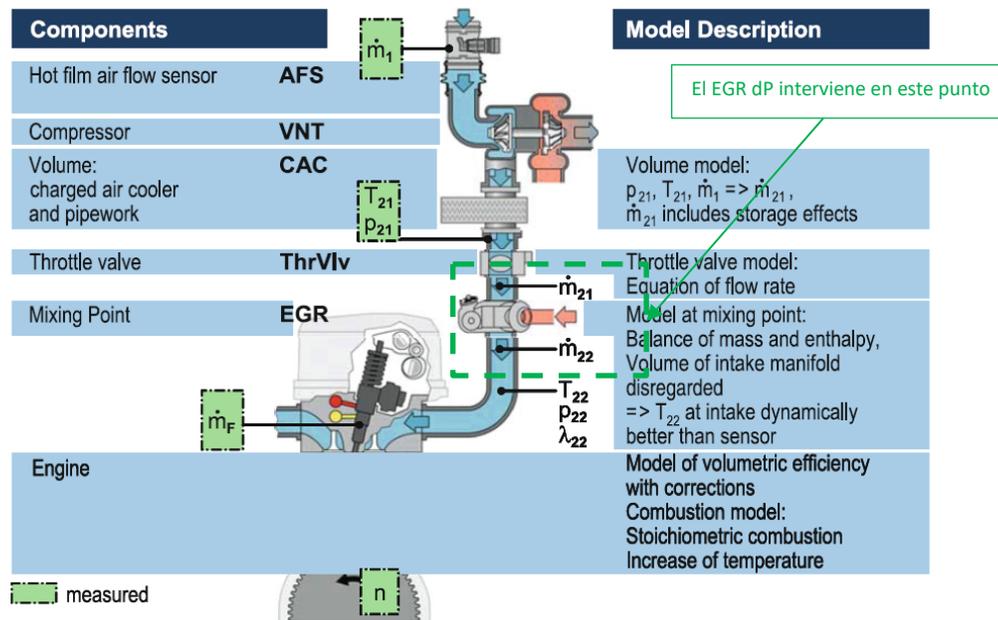


Figura 13: Esquemático de un sistema de suministro de aire en un motor a diésel.  
Fuente: (Mollenhauer & Tschöke, 2010)

Todos estos sistemas son importantes en el control de la mezcla de aire, ya que justo antes del tiempo de expansión, se producen regiones con valores altos de  $\lambda$  dentro de la cámara de combustión, generando temperaturas que favorecen la creación de monóxido de nitrógeno (NO), que resulta muy inerte después de formarse. La forma más efectiva de prevenir la formación de NO<sub>x</sub> es bajar la temperatura promedio en la cámara de combustión, y la mejor forma hasta ahora de lograr esto es usar sistemas de EGR. Los sistemas de EGR no pueden operar permanentemente, es decir, no se puede tener un reflujó a un ritmo constante de los gases de escape hacia la cámara de combustión, dado que la cantidad de gases recirculados cambia directamente los valores de  $\lambda$  en el proceso; se tiene entonces que mantener un balance entre dos extremos de temperatura que llevan cada uno a la formación de EMD (Kökkülünk et al., 2014; Krishnamurthy et al., 2007; Zhan, 2009):

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> están directamente relacionadas a la eficiencia del proceso de combustión: a mayor eficiencia (mayor potencia entregada por el motor), es menor la generación de CO<sub>2</sub>.
- Sin embargo, una mayor eficiencia es síntoma directo de una temperatura más elevada de la flama creada durante la combustión, lo que incrementa las cantidades de NO<sub>x</sub>.
- Cuando se baja la temperatura para disminuir la creación de NO<sub>x</sub>, se favorece la generación de hollín (PM), ya que una menor temperatura implica quemar menos residuos sólidos.

Las interacciones mencionadas arriba llevan a que cuando se demanda más potencia del motor (con el HDV operando a carga máxima), la generación de NO<sub>x</sub> en promedio suba, ya que el porcentaje de los gases recirculados (%EGR) es menor. La siguiente figura ilustra como el %EGR (consecuencia del sistema de control) y los diferentes valores de  $\lambda$  (que afecta la temperatura) interactúan y afectan directamente las cantidades de EMD en relación a la energía disipada por el motor:

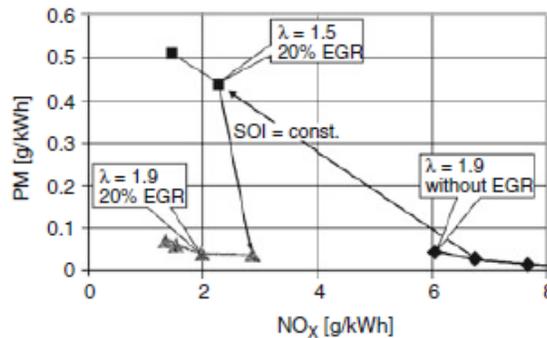


Figura 14: Generación de EMD como función de  $\lambda$  y del %EGR.  
Fuente: (Mollenhauer & Tschöke, 2010)

Como todos los otros sistemas de control de EMD, el EGR requiere de una cantidad considerable de instrumentación. El EGR dP es parte del subsistema que mide el caudal másico (*mass flow*, denotado por el símbolo  $\dot{m}$ ) de los gases de escape. Esta magnitud expresa la variación de la masa de los gases con respecto al tiempo

en un área específica. El sensor es colocado en paralelo, desde el punto de vista neumático, a los extremos de un tubo Venturi, que minimiza los efectos de variación en el caudal producto de la operación cíclica del motor (Agu, Hjulstad, Elseth, & Lie, 2017; Eroglu, 2016), como se muestra en el esquemático de abajo:

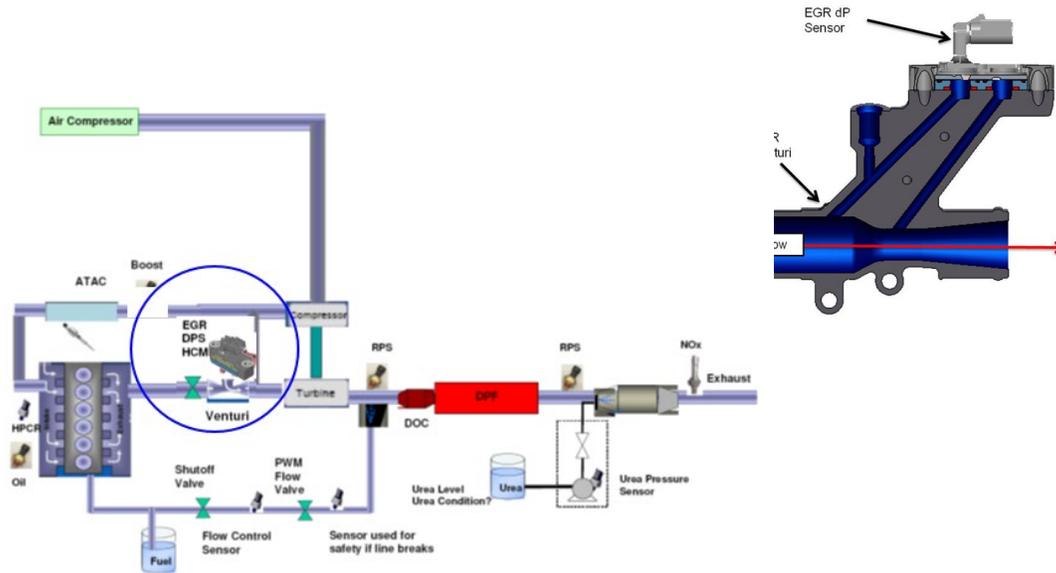


Figura 15: Esquemático de la ubicación del EGR dP en el sistema de control de EMD.  
Fuente: Elaboración propia.

Debido a cómo trabaja un tubo Venturi, siempre habrá un extremo (la apertura, a la izquierda en el esquemático de montaje), que tendrá una presión más elevada que el otro. A estos dos extremos se les nombra "Lado Alto" ("High Side" – HS) y "Lado Bajo" ("Low Side" – LS). Las dimensiones del tubo Venturi están diseñadas para obtener un diferencial de presión entre ambos extremos cercano a 0.35 bar. El EGR dP es parte de un conjunto de tres sensores (presión absoluta, temperatura y diferencial de presión) que se usan para obtener el caudal másico en los gases de escape, que es consecuencia directa de la apertura de la válvula de EGR, que a su vez influye en el %EGR.

La aproximación de  $\dot{m}$  puede ser obtenida a través del modelo desarrollado por Yang, et al (Yang, Winward, O'Brien, Stobart, & Zhao, 2016). Abajo un esquemático de las condiciones en el tubo Venturi:

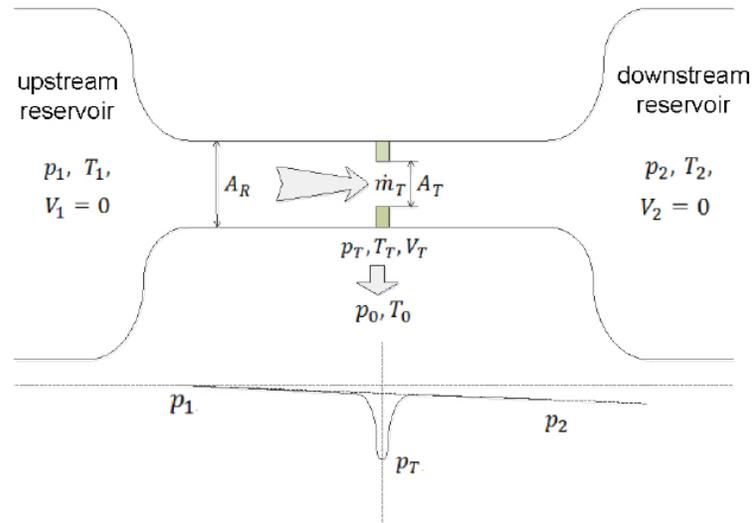


Figura 16: Representación de las condiciones usadas en el desarrollo del modelo para calcular el caudal másico en el EGR.

Fuente: (Yang et al., 2016)

En la figura, el punto señalado en verde es la ubicación del diámetro más pequeño del tubo Venturi, donde la presión baja abruptamente, la flecha señala el sentido del flujo de los gases de EGR y se tienen las siguientes variables, con subíndices dependiendo de la ubicación:

$V$ : Velocidad del gas.

$p$ : Presión.

$A$ : Área transversal.

$T$ : Temperatura.

En este modelo se asumen varias condiciones ideales:

- Hay condiciones a los extremos de la tubería donde el gas se encuentra estancado (no hay flujo).
- Se desprecia el impacto de un enfriador en el circuito del sistema de EGR.
- El flujo de EGR es unidireccional o si acaso nulo ( $p_1 \geq p_2$ ) y adiabático (sin fricción).

- El diámetro de la tubería es constante, excepto en la ubicación de la válvula de EGR, que varía dicho diámetro para variar el %EGR.
- Las condiciones de presión y temperatura en el punto de menor diámetro no son conocidas, y se estiman indirectamente a través del mismo modelo.

Así, se tiene que el caudal másico en el circuito del EGR está dado como:

$$\dot{m}_{egr} = \frac{A_{egrmax} f(X_{egr}) p_1}{\sqrt{RT_1}} \phi\left(\frac{p_2}{p_1}\right), \quad \frac{p_2}{p_1} \leq 1 \quad (13)$$

Donde:

$X_{egr}$ : Es una magnitud normalizada que expresa la apertura de la válvula de EGR entre 0 (cerrado) y 1 (máxima apertura).

$A_{egrmax}$ . Es la sección transversal de la apertura de la válvula cuando  $X_{egr}=1$ .

$R$ . Es la constante de gas ideal para la mezcla específica de los gases en el EGR (la razón de la constante de gas molar entre la masa molar de la mezcla de gases).

$f(X_{egr})$ . Es una función no lineal obtenida experimentalmente al mantener  $p_1$  y  $p_2$  constantes y solo variar la apertura de la válvula de EGR.

$\phi\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ . Es una aproximación de la función  $\phi\left(\gamma, \frac{p_T}{p_0}\right)$ , que depende del coeficiente de dilatación adiabática  $\gamma$  (la razón entre la capacidad calorífica de un gas a presión constante y la capacidad calorífica a volumen constante) y la razón de presión en el tiempo con respecto a las condiciones iniciales  $\frac{p_T}{p_0}$ , denotada como:

$$\phi\left(\gamma, \frac{p_T}{p_0}\right) = \left(\frac{p_T}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_T}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \quad (14)$$

Para efectos de control de la apertura de la válvula del EGR por parte del ECU, los valores de  $A$ ,  $f$ ,  $R$  y  $\phi$  son guardados en memoria, y la instrumentación se encarga de obtener los valores de  $T_1$ ,  $p_1$  y  $p_2$  en el modelo. En particular, el EGR dP se usa para obtener el valor de  $p_2$ .

Si nos acercamos un poco más en la figura 15, se observa un corte transversal del EGR dP, donde se pueden resaltar las siguientes características:

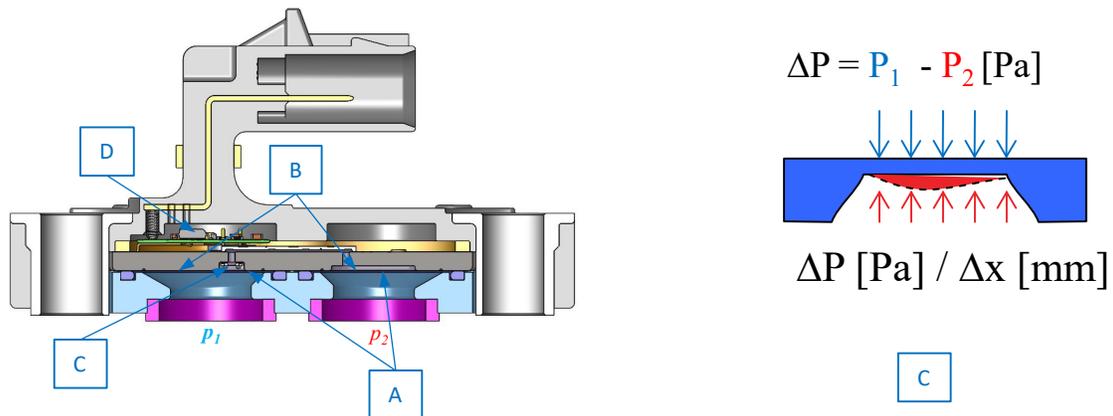


Figura 17: Corte transversal del EGR dP y esquemático de la deflexión de la membrana de silicio en el dado MEMS.  
Fuente: Elaboración propia.

- A) Los gases de escape en un motor a diésel son altamente corrosivos (McClellan et al., 2012; Suárez-Bertoa et al., 2016), por lo que el EGR dP usa dos membranas, o diafragmas, de Inconel® directamente en los puertos que están en contacto con el flujo de gases. El Inconel es una súper aleación, hecha principalmente de Ni, Cr y Fe, que tiene excelente resistencia a la corrosión y no cambia en términos prácticos sus propiedades mecánicas en los rangos esperados de operación en el sistema (Miracle & Senkov, 2017; Townsend, Senin, Blunt, Leach, & Taylor, 2016). Los sellos alrededor de los diafragmas están hechos de fluorosilicón, un elastómero también muy resistente a la corrosión y los cambios de temperatura (Cornelius & Monroe, 1985).
- B) Las membranas de Inconel, de 0.001" de espesor, transmiten la presión del gas hacia dos cámaras selladas, que contienen aceite a base de Silicón.

Las dos cámaras representan el HS y LS mencionados anteriormente. El aceite usado también puede considerarse como estable, desde el punto de vista de mecánica de fluidos, a las variaciones de temperatura esperadas (entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $140^{\circ}\text{C}$ ) (Aziz, Fan, Khan, Haroon, & Cheng, 2019). El objetivo de este estudio está directamente relacionado con la prevención de ensamble de piezas del EGR dP que presenten fuga del aceite de silicón fuera de las cámaras selladas, situación que implica una falla catastrófica (Fonseca & Sequera, 2011) de la pieza en campo.

- C) Entre ambas cámaras se encuentra un circuito (o "dado") MEMS, que contiene un arreglo de piezo-resistencias acopladas a una membrana de silicio. El aceite, de cada lado, empuja y flexiona la membrana de manera proporcional a la fuerza ejercida por los diafragmas. Al flexionarse la membrana, la resistencia total de las piezo-resistencias cambia, de manera proporcional al *diferencial* de presión entre HS y LS. Dicho diferencial en el modelo detallado arriba es:

$$dP = p_1 - p_2$$

- D) La resistencia total del arreglo es medida y amplificada por un ASIC, que entrega la respuesta del sensor como un voltaje proporcional a la señal de alimentación proporcionada por el ECU.

Incluyendo al EGR dP, los tres instrumentos de medición involucrados en el cálculo del caudal másico en el EGR son transductores. En ingeniería, un transductor recibe un estímulo físico como forma de entrada y la convierte a otro tipo de energía. Un transductor puede ser tanto un sensor o un actuador. Un sensor es un transductor que genera una señal eléctrica proporcional a un parámetro físico, biológico o químico (Industry, 2019). Un actuador es un transductor que acepta una señal eléctrica y produce una respuesta física (Song & Lee, 2008). El EGR dP es por tanto un sensor de diferencial de presión, que tiene como entrada la presión en los dos puertos en los extremos del tubo Venturi, y como salida una señal proporcional al voltaje de alimentación del ECU, 5V en este caso.

En la figura 18 se muestra un diagrama de como la presión de los gases de escape se transmite hacia el dado MEMS. Dicha presión, que se ejerce sobre cada puerto, empuja a cada diafragma, que a su vez empuja al aceite en cada cámara hacia dentro del sensor. Al ser el aceite un medio incompresible (un fluido con densidad constante al ser desplazado) en los rangos de temperatura y presión donde opera el EGR dP (Goodfellow & Curd, 2020), la mayor parte de la fuerza aplicada por los diafragmas sobre el fluido será transmitida hacia el dado MEMS. El sensor tiene una membrana flexible hecha de silicio, que se flexiona hacia arriba o abajo dependiendo de la resultante de las fuerzas aplicadas a través del HS y el LS.

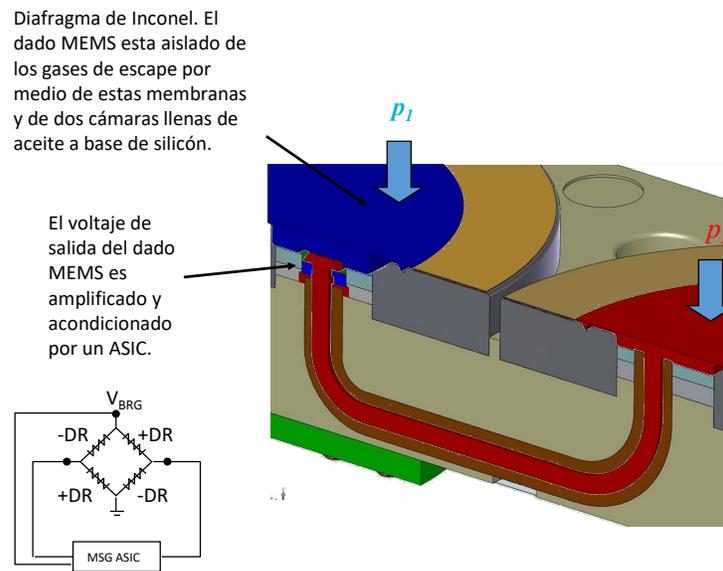


Figura 18: Transmisión de la presión de los gases de escape hacia el dado MEMS.  
Fuente: Elaboración propia.

La deflexión de la membrana afectará directamente la respuesta del sensor a través de un efecto conocido desde hace décadas en los semiconductores. Los sensores MEMS de presión, como el empaquetado en el EGR dP, fueron los primeros dispositivos MEMS en ser comercializados a una escala industrial. Usan el efecto de piezo-resistencia en semiconductores descubierto por C. Smith (C. S. Smith, 1954) en 1954: básicamente, un material semiconductor (como Si o Ge), tiene un cambio considerable en su resistencia eléctrica cuando se le aplica un estrés mecánico;

este fenómeno no altera también el potencial eléctrico, como ocurre con el efecto piezo-eléctrico (Chollet & Liu, 2016).

Las piezo-resistencias se construyen sobre la membrana de silicio, formando una configuración de puente de Wheatstone, muy común en instrumentación (Ekelof, 2001; Ștefănescu, 2011). El arreglo de puente, con las cuatro resistencias de la misma magnitud (conocido como puente balanceado), elimina la necesidad de una referencia externa para calcular el cambio de voltaje en base al cambio en las resistencias variables (Chollet & Liu, 2016). La figura 19 muestra un esquema del arreglo eléctrico de las piezo-resistencias del puente y de su colocación en el dado MEMS, en los bordes de la membrana de silicio, donde el estrés mecánico es máximo.

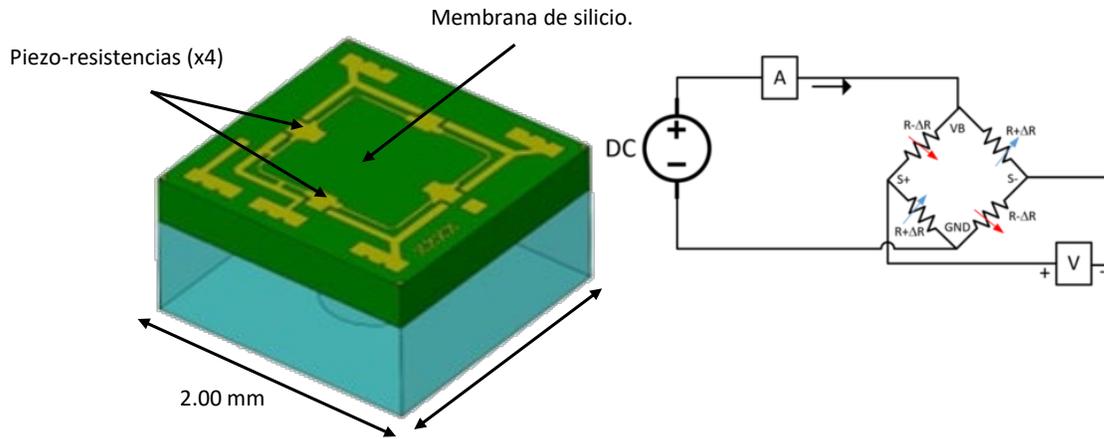


Figura 19: Representación de la posición física de las piezo-resistencias en el dado MEMS y su configuración eléctrica.  
Fuente: Elaboración propia.

En esta configuración eléctrica, el voltaje de salida  $VB$  en base al voltaje de entrada  $V_{in}$  está dado por (Chollet & Liu, 2016):

$$VB = \frac{V_{in}}{R} \Delta R \quad (15)$$

Y la sensibilidad del circuito (la magnitud mínima para producir una respuesta, dada una relación conocida de señal a ruido (Amico & Natale, 2001)) está dada por:

$$s = \frac{V_{in}}{R} \quad (16)$$

Como se ilustra en la figura 19, dos de las piezo-resistencias reaccionan en dirección opuesta al otro par. Esto quiere decir que las resistencias tienen orientación diferente en la membrana de silicio. Para resistencias mucho más largas que anchas, es posible enunciar el cambio relativo en resistencia como:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (17)$$

Donde  $\pi_i$  es el coeficiente piezo-resistivo y  $\sigma_i$  es el componente de estrés mecánico, ya sea paralelo al paso de la corriente ( $l$  de longitudinal) o perpendicular a éste ( $t$  por transversal). El silicio es un elemento anisotrópico, es decir, la magnitud de su deformación, y de todas sus propiedades mecánicas, depende de la dirección de la fuerza aplicada, que a su vez está relacionada con la estructura del cristal que compone a la membrana. Esto hace que el cálculo de los coeficientes piezo-resistivos sea complejo (Kaajakari, 2018), sin embargo una aproximación aceptada en la literatura es la siguiente (Chollet & Liu, 2016):

$$\begin{aligned} \pi_l &\approx 71.8^{-11} \left[ \frac{1}{Pa} \right] \\ \pi_t &\approx 66.3^{-11} \left[ \frac{1}{Pa} \right] \end{aligned}$$

La figura 20 presenta un esquemático de la colocación de las piezo-resistencias relativas a la estructura general del dado cuando se tiene una membrana de silicio cuadrada, ilustrando el estrés longitudinal y transversal.

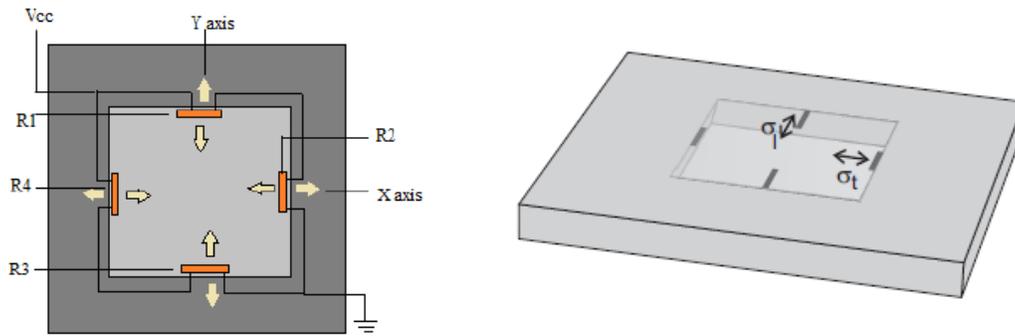


Figura 20: Orientación de las piezo-resistencias en una membrana de silicio cuadrada.  
Fuentes: (Chollet & Liu, 2016; Das & Roy, 2016)

El efecto piezo-resistivo sufre de una fuerte dependencia térmica (Yamada, Nishihara, Shimada, Tanabe, & Shimazoe, 1983), que debe ser ajustada en la mayoría de las aplicaciones, donde se da una calibración siguiendo el modelo matemático asociado, cuyo resultado se guarda en una EEPROM construida dentro del ASIC. Aun cuando existen algoritmos de calibración publicados para sensores diferenciales de presión (John, Abhay, Pramod, Ajayakumar, & Natarajan, 2010), los detalles de la calibración del EGR dP son tecnología propietaria de la compañía que lo fabrica. Baste decir que el proceso de calibración logra ajustar la salida del EGR dP a una tolerancia de  $\pm 1\% V_{in}$  en todo el rango de diferencial de presión y temperatura usado en la medición pertinente, más que suficiente para cumplir con las necesidades de instrumentación en el control del EGR.

## 2.5 CLASIFICACIÓN DE POSIBLES FALLAS EN SENSORES MEMS

Los procesos de fabricación actuales han logrado superar los requerimientos de precisión necesarios para la colocación correcta de las piezo-resistencias, esencial para lograr la sensibilidad demandada del sensor (Jakati, Balavalad, & Sheeparamatti, 2017; Rajavelu, Sivakumar, Rathnam, & Sumangala, 2013; Shaby & Juliet, 2011). Esta evolución está directamente asociada a la confiabilidad lograda en los MEMS más básicos (Tanner, 2009), como el que nos ocupa. El dado MEMS del EGR dP, como todos los sensores de presión MEMS, se encuentra entre los llamados Tipo I en la taxonomía de confiabilidad enunciada primero por P. McWhorter (Chollet & Liu, 2016; McWhorter, Miller, Miller, & Rost, 2001):

Tabla 2. Taxonomía de confiabilidad de MEMS.

Clase	I	II	III	IV
Características	No hay partes móviles.	Partes móviles, no hay fricción o impactos entre partes.	Partes móviles, existen superficies de impacto.	Partes móviles, existe impacto y fricción entre partes.
Ejemplos	Acelerómetros, sensores de presión, Inductores, inyectores de tinta.	Giroscopios, Resonistor, Filtros.	DLP, Relevadores, Válvulas, Bombas.	Switch óptico, scanner, sistemas de bloqueo.

Fuente: (Chollet & Liu, 2016)

Entre más alto el número en esta clasificación, existen más problemas de confiabilidad, directamente asociados a interacciones mecánicas. El grado de confiabilidad derivado de esta taxonomía para el dado MEMS del EGR dP está alineado con la realidad y con datos de dispositivos similares (D., 2018; Tanner, 2009). Mientras que el número de piezas rechazadas por cliente en el EGR dP oscila en un rango cercano a 30 PPM (Partes Por Millón), el número de piezas rechazadas que puede ser atribuido a un defecto de fabricación del dado MEMS es de hecho 0 PPM. Esto no significa que el proceso de manufactura del dado MEMS sea perfecto, pero sí lo suficientemente confiable como para provocar que todos los defectos del dado, según la evidencia empírica -basada en más de 4 millones de piezas-, puedan ser interceptados en las máquinas de prueba en el proceso de fabricación del EGR dP.

## 2.6 DESCRIPCIÓN DE INTERFACES INTERNAS EN EL EGR DP

De lo anterior se concluye que los problemas de confiabilidad del EGR dP no son del nivel 1 (según la clasificación enunciada van Driel, et al (van Driel et al., 2007)). La evidencia muestra que más del 95% de las fallas en campo del EGR dP son del nivel 2, donde el paquete puede fallar. El resto de los defectos, según la evidencia, son provocados por un mal manejo de los usuarios finales de las piezas. Este trabajo se ocupa de uno de los problemas de nivel 2, asociado con la hermeticidad del

paquete. Como se ha dicho, el medio que transmite la presión de los gases de escape hacia el dado MEMS es aceite a base de silicón. Para que se dé una transferencia efectiva de la presión externa, el aceite debe ser confinado en ambas cámaras, es decir, la hermeticidad del paquete debe de conservarse en un rango controlado durante la vida útil del producto. Las cámaras de aceite se forman a través de 6 interfaces (las superficies donde se unen dos componentes), como se muestra en la figura 21:

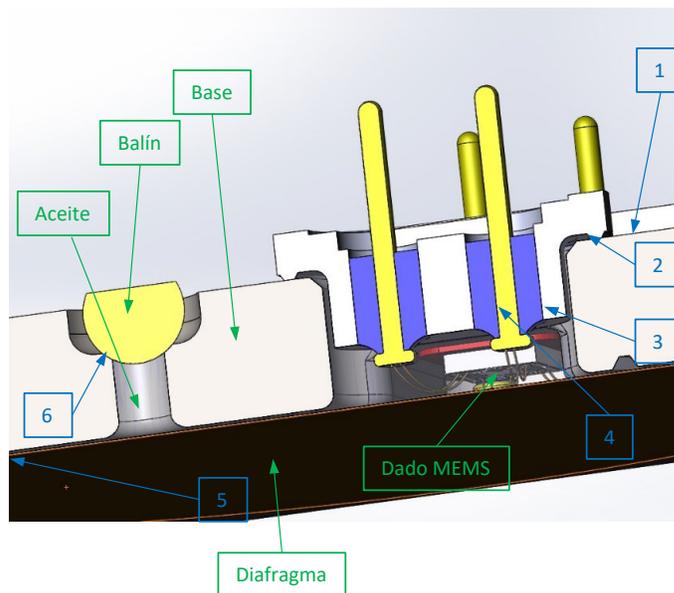


Figura 21: Posición relativa de las interfaces que forman la cavidad de aceite en el EGR dP.

Fuente: Elaboración propia.

- Las interfaces 1, 2 y 6 se forman a través de Soldadura por Resistencia (*Resistance Welding*), un proceso donde se aplica uno o más pulsos de energía eléctrica controlados, generando una potencia que provoca el calor suficiente, cuando el material de la pieza se opone al paso de la corriente, como para fundir los metales involucrados (Ling, Wan, Wong, & Li, 2010). En particular, en la interfaz 6 (entre el balín y la base) se usa un método conocido como Soldadura por Puntos (*Resistance Spot Welding – RSW*), donde la piezas a soldar son presionadas por una prensa, con fuerza controlada, al momento de aplicar una corriente eléctrica (Wan, Wang, Zhao, Huang, & Yin, 2017). Los parámetros que son controlados en el proceso

de soldadura del balín en el EGR dP son: fuerza, corriente, tiempo, voltaje (en términos cuantitativos) y alineación (en términos cualitativos).

- Las interfaces 3 y 4 son creadas a través de un sello vidrio-metal (*Glass-to-Metal-Sealing* GTMS) (Houskeeper, 1923), en particular del tipo de compresión. En esta técnica se introduce vidrio derretido entre dos metales, la parte externa que es un soporte y la parte interna que es un conductor. Debido a que el vidrio tiene una resistencia a la compresión (resistencia a ser reducido en tamaño por fuerzas externas) de 10 a 20 veces mayor a su resistencia a la tensión (resistencia a ser deformado aumentando su tamaño en la dirección de la fuerza aplicada), se elige entonces un material para el soporte con un coeficiente de expansión térmica mucho más alto que el del vidrio o del conductor (Pask, 1948). Cuando el ensamble de los tres componentes se enfría, el metal del soporte oprime firmemente el vidrio contra el conductor, sin riesgo de rotura o de falla por choque térmico, creando un sello hermético. La figura 22 muestra un esquemático de los componentes mencionados, en un arreglo típico.

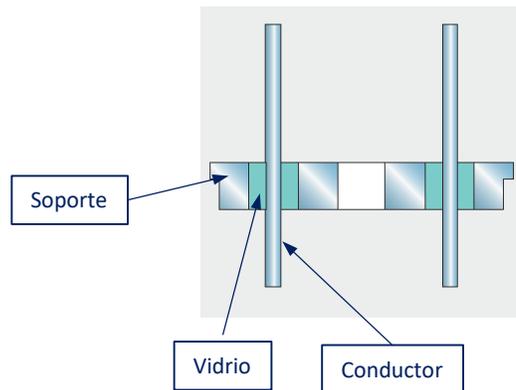


Figura 22: Arreglo típico de sello vidrio-metal.  
Fuente: ("SCHOTT glass-to-metal sealing (GTMS) technology | SCHOTT North America," 2018).

- La interfaz 5 se crea a través de un sello de Sifel®, un elastómero a base de silicón, muy resistente a los ataques químicos una vez curado ("Potting Gel SIFEL8000 series," 2018). Un elastómero es un polímero que puede ser

sometido a una deformación elástica considerable, hasta 300%, con un estrés mecánico relativamente bajo (Perduta & Putanowicz, 2015). Para el caso del EGR dP, el Sifel permite crear un sello con los diafragmas de Inconel de una forma relativamente sencilla –con un proceso de dispensado–, a comparación de un proceso de soldadura, que sería extremadamente difícil dadas las propiedades mecánicas del Inconel (Yangfan, Xizhang, & Chuanchu, 2019) y la flexibilidad del diafragma (por el hecho de tener solo 0.001” de grosor).

## 2.7 POSIBLES ALTERNATIVAS PARA PRUEBA DE HERMETICIDAD

A excepción de la interfaz 6, todas las uniones ilustradas en la figura 21 se prueban en busca de posibles fugas en el 100% de las piezas. Los métodos usados para prueba de fuga en las interfaces 1 – 5 son las dos más comunes (Tao & Malshe, 2005), ambos descritos en el estándar MIL-STD-883H TM 1014.13.

- Prueba de Fuga Gruesa (*Gross Leak Test*). A veces referido como “método de la lata abierta”, al ser aplicable a paquetes no terminados. En este caso, la pieza se coloca en una estación de prueba por donde un lado de la interfaz se presuriza helio, y por el otro se encuentra un detector de helio. Si hay un canal de fuga relativamente grande, el detector medirá una subida repentina en la cantidad de moléculas de helio en el lado de la medición, y se habrá detectado una fuga (“A Practical Guide to TM 1014 (Seal) - TJ Green Associates LLC,” 2016).
- Prueba de Fuga Fina (*Fine Leak Test*). Si un paquete tiene una fuga y es colocado dentro de un recipiente presurizado con helio –lo que se denomina “bombardeo” –, una fracción del gas presurizado entrará en el paquete a través del canal de fuga. La cantidad absoluta de helio que entra al paquete depende entonces del tamaño del canal de fuga, el tiempo que la pieza estuvo dentro de la cámara presurizada, y el diferencial de presión entre el helio en la cámara de bombardeo y la presión del helio dentro del paquete. Después de sacar el paquete de la cámara de

bombardeo, se conecta a un detector de helio, que mide la cantidad de moléculas de helio que escapan del paquete. La cantidad absoluta de helio saliendo del paquete depende aquí del tamaño del canal de fuga y la presión de helio dentro del paquete, que a su vez depende de la masa de helio y el volumen interno del paquete (Greenhouse, Lowry, & Romenesko, 2011).

La expresión matemática que describe este fenómeno se conoce como la ecuación Howl-Mann, que D. A. Howl y C. A. Mann enunciaron en 1965 (Howl & Mann, 1965). Aun cuando el método descrito en este trabajo no hace uso directo de esta ecuación, se reproduce aquí porque constituye una referencia útil para validar casi cualquier método de medición de hermeticidad:

$$R_1 = \frac{LP_E}{P_0} \left(\frac{M_A}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{Lt_1}{VP_0} \left(\frac{M_A}{M}\right)^{\frac{1}{2}}\right]} \right\} e^{-\left[\frac{Lt_2}{VP_0} \left(\frac{M_A}{M}\right)^{\frac{1}{2}}\right]} \quad (18)$$

Donde:

$R_1$ . Grado de fuga medido en el gas de rastreo (He) a través del canal de fuga, en atm-cc/s de Helio.

$L$ . El grado de fuga equivalente en atm-cc/s de aire.

$P_E$ . La presión en la cámara presurizada, en atmósferas de Helio, absoluto.

$P_0$ . La presión atmosférica, absoluto (1).

$M_A$ . El peso molecular del aire en g (28.7, de acuerdo al estándar).

$M$ . El peso molecular del gas de rastreo (He) en g (4).

$t_1$ . El tiempo de exposición a  $P_E$  en segundos.

$t_2$ . El tiempo de "reposo" de la pieza, después de ser presurizada, y antes de ser medida, en segundos.

$V$ . El volumen interno del paquete en cc.

Las particularidades geométricas del EGR dP impiden aplicar cualquiera de los métodos descritos arriba para probar la interfaz 6. Es ahí donde es relevante este trabajo. Como se mostrará en la discusión experimental, se puede medir indirectamente la magnitud del grado de fuga (es decir su hermeticidad) en la interfaz 6 a través de la respuesta del dado MEMS a un estímulo externo aplicado solamente en la interfaz 6. Los métodos usados para probar las otras interfaces no pueden ser aplicados en este caso, ya que no se da ninguna de las siguientes situaciones:

- La existencia de una cavidad "hueca" entre la interfaz de interés en el paquete y el sensor MEMS. Es decir, no se puede dar un proceso de bombardeo de helio al paquete y una posterior medición de la posible intrusión del helio en dicha cavidad (Howl & Mann, 1965). Se mostrará que se puede introducir helio en la cavidad de interés, pero el hecho de que la cavidad está llena de aceite impide la expulsión gradual del gas, necesaria para el método de medición detallado en el estándar (Costello et al., 2012; Goswami & Han, 2008).
- La posibilidad de probar la interfaz a mitad del proceso de ensamble, midiendo en este caso el caudal del paso de helio (o algún otro gas o fluido) entre un instrumento de prueba y la atmósfera, separados por la interfaz bajo prueba ("A Practical Guide to TM 1014 (Seal) - TJ Green Associates LLC," 2016). Esto derivado del hecho de que el balín es la última pieza del ensamble que completa la cavidad de aceite. Este factor ha provocado que hasta ahora la única alternativa para probar la interfaz 6 sean pruebas destructivas.

El problema descrito arriba es común en los dispositivos MEMS (Tao & Malshe, 2005). La particularidad del EGR dP es que se tiene una cavidad llena de un fluido, que puede absorber helio (o cualquier otro gas), entre la interfaz a probar y el sensor MEMS, cuando en la mayoría de los casos el factor preponderante es el muy escaso volumen dentro del paquete (Goswami & Han, 2008; Tao & Malshe, 2005).

### 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

El objetivo de este trabajo es demostrar la siguiente hipótesis: Es posible definir una prueba de hermeticidad no destructiva para un dispositivo sensor de presión MEMS, con una cavidad llena con aceite de silicón, sin efectos perjudiciales sobre fiabilidad del dispositivo o el desempeño de la producción en una línea de manufactura para productos automotrices.

La interfaz #6 en la figura 21 se crea a través de RSW en la máquina mostrada en la figura 23

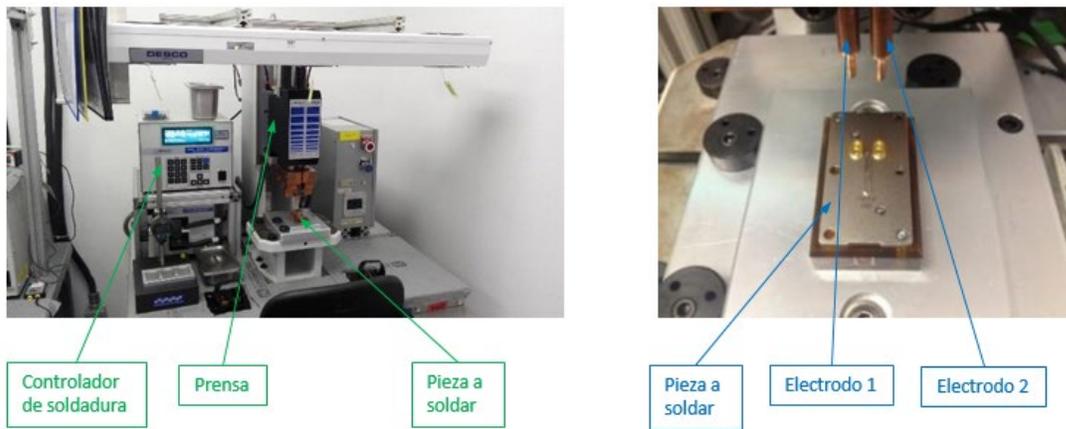


Figura 23: Máquina de soldadura por resistencia para el EGR dP.  
Fuente: Elaboración propia.

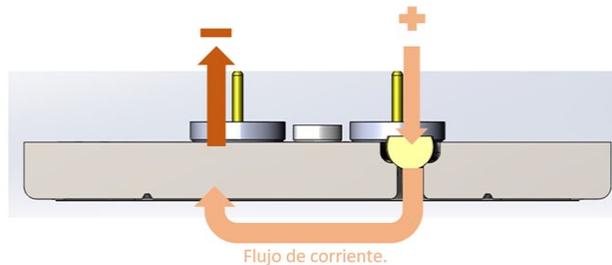


Figura 24: Esquemático de la aplicación de energía en el proceso de soldadura por resistencia para el EGR dP. La corriente circula a través del balín y la placa base.  
Fuente: Elaboración propia.

La prensa aplica una fuerza regulada al balín, empujándolo hacia la base. Después de que la prensa ha bajado, el controlador aplica dos pulsos, el primero con el voltaje controlado y el segundo con la corriente controlada. Los tiempos para aplicar los pulsos de energía se miden en milisegundos. En este caso se origina una soldadura que en la literatura es conocida como *Nugget Spot Welding* (que podría traducirse como “soldadura de aglomerada en un punto”) (Manladan et al., 2017; Zhou, Shi, & Cai, 2017). El resultado es que el balín pasa de una forma esférica a estar claramente deformado en la parte superior (que está en contacto con el electrodo) y en la parte inferior (que está en contacto con la base), con los metales del balín y de la base creando una unión a nivel microscópico, debido al calor disipado al momento de que una corriente circula a través de ambos metales.

Abajo un esquemático mostrando las dimensiones nominales de la superficie soldada. Aun cuando se genera una nueva interface en el EGR dP, toda región en donde dos materiales se encuentran tendrá siempre un cierto grado de permeabilidad, es decir, no hay unión perfectamente hermética. El tamaño de la interfaz  $\delta$ , y de los posibles defectos que pueden amenazar el nivel de hermeticidad, han sido fundamentales para la formulación del método de prueba mostrado en este trabajo, como se mostrará en este capítulo.

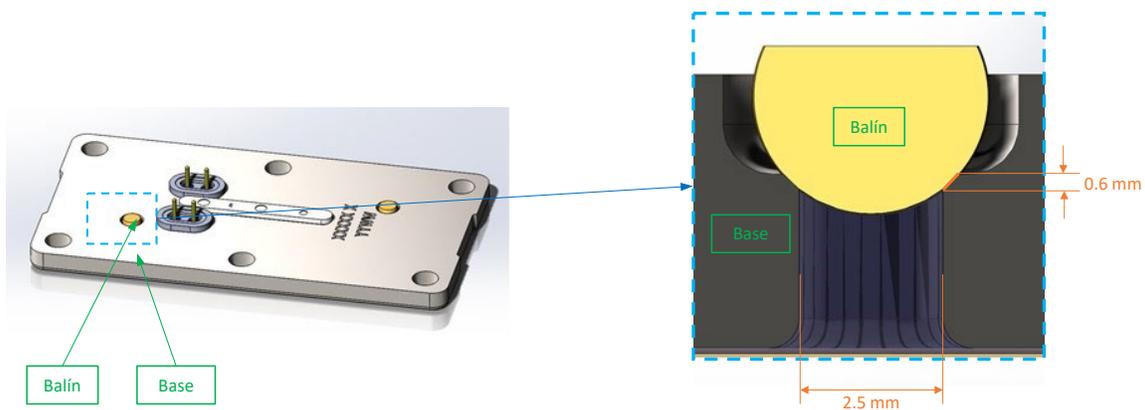


Figura 25: Esquemático de las dimensiones nominales después de soldar el balín a la base.

Fuente: Elaboración propia.

Sin importar el tamaño de la pieza, el proceso de RSW entrega energía que puede medirse en términos del calor de Joule, expresado como (Kimchi & Phillips, 2017):

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (I(t))^2 R(t) dt \quad (19)$$

Donde:

*E*. Cantidad de calor de Joule generado durante el proceso.

*I(t)*. Corriente de soldado.

*R(t)*. Resistencia dinámica de los metales involucrados.

*T1* y *T2*. Los tiempos de inicio y final durante la transferencia de energía.

Como la misma ecuación lo expresa, el proceso de soldadura involucra una transferencia de energía y una transición de estados en los metales soldados. En un primer momento, la resistencia en el circuito es dominada por la resistencia de contacto entre las superficies de los electrodos y de los metales a soldar, dado que los elementos externos a los metales están involucrados en la resistencia total. Sin embargo, cuando se introduce una corriente eléctrica se genera calor, que provoca la destrucción de los elementos externos a las piezas soldadas y que los metales se funden (se da una transición de fase, en términos de metalurgia). Durante este proceso, la resistencia total del circuito cambia, de ahí el término Resistencia Dinámica (Zhou et al., 2017).

Es importante resaltar el nivel de confiabilidad ya alcanzado por el proceso descrito arriba: la evidencia empírica muestra un nivel de rechazo en campo (definido como la cantidad de piezas que pierden aceite a través de la interfaz 6 en algún punto de la vida del producto relativa a la cantidad de piezas fabricada) menor a 5 PPM (partes por millón). Con base en los datos de piezas rechazadas y confirmadas como fallas de la interfaz 6, y a través de un análisis de Weibull (Abernethy, 1996; Hallinan, 1993) la proyección muestra que el nivel de fallas esperado es en promedio de una pieza por año, variando desde 0 hasta 8 en el peor de los casos como se muestra en la figura 26. La relativamente grande variación en los extremos del estimado es producto de la incertidumbre habitual al

usar este tipo de análisis (Genschel & Meeker, 2010), y es esperada dada la muy pequeña cantidad de defectos contra el total de producción. Todos los análisis estadísticos presentados en este trabajo se obtuvieron a través del software Minitab®.

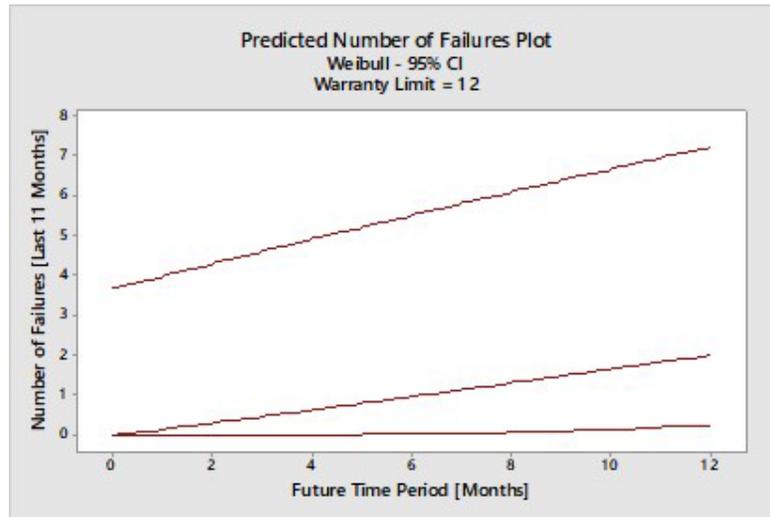


Figura 26. Estimado de cantidad de piezas rechazadas por fuga en la interfaz 6 dada la información disponible sobre fallas confirmadas.  
Fuente: Elaboración propia.

Las técnicas de monitoreo en tiempo real de  $E(t)$ ,  $I(t)$  o  $R(t)$ , o incluso todas simultáneamente, forman parte de los más recientes avances para un mejor control en los procesos de RSW (Summerville C., 2017), sin embargo la literatura no muestra ningún método lo suficientemente robusto como para bloquear un nivel de fallas inferior a 5 PPM. En particular, los procesos con análisis de datos basado en redes neuronales ofrecen alternativas interesantes. Xiaodong et. al (Wan, Wang, Zhao, Huang, et al., 2017) y otros (Ling et al., 2010; Wan, Wang, Zhao, & Huang, 2017) han propuesto la utilización de redes neuronales en la predicción de fallas en tiempo real en sistemas de soldadura. Los sistemas basados en redes neuronales necesitan una cantidad relativamente grande -si lo observamos en el contexto de 5 PPM- de ejemplos para desarrollar una capacidad de predicción aceptable (Baum & Haussler, 1989). Dada la variedad de posibles defectos en la materia prima y la muy baja frecuencia en que ocurren, no es práctico buscar la

construcción de un sistema de control basado en redes neuronales en este caso. Además de lo mencionado arriba, en el caso de la soldadura en la interfaz 6, el tamaño impone un obstáculo que de momento parece ir más allá de las capacidades de detección de defectos, al momento de soldar la pieza, de los sistemas disponibles. Para dejar claro este punto, abajo se muestran cortes transversales hechos en dos piezas con falla de fuga de aceite, y examinados bajo un microscopio electrónico. Ambos defectos tienen un ancho máximo menor a 10  $\mu\text{m}$ , y fueron evidentes después de más de 20 ciclos de presión aplicados.

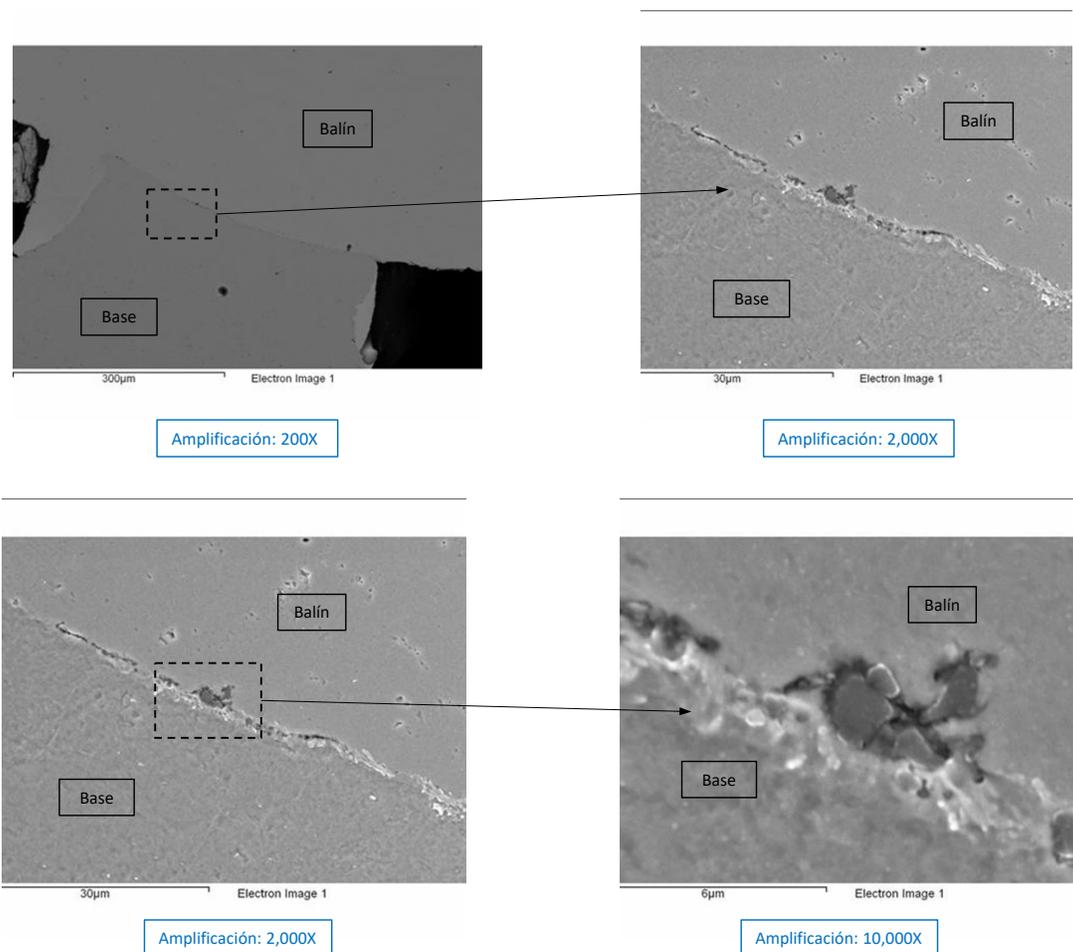


Figura 27: Corte transversal de piezas con fuga de aceite confirmada. El ancho del canal de fuga no llega a los 10  $\mu\text{m}$ .  
Fuente: Elaboración propia.

Además de las técnicas de monitoreo en tiempo real mencionadas arriba, existen métodos de Prueba No Destructiva (*Non-Destructive Testing*, NDT (Gholizadeh, 2016)) que pueden ser aplicados para probar la interfaz 6. Existen cuatro NDT muy usadas en el caso de uniones creadas con RSW (Testing, 2012), todas de ellas con serias limitantes en el caso de la interfaz a probar:

- Inspección por Ultrasonido (*Ultrasonic Testing* - UT). Se aprovecha de reflexión o refracción de ondas acústicas al encontrar obstáculos cuando dichas ondas se propagan a través de un material. Si un obstáculo se interpone en el camino de la onda, esta es reflejada hacia el emisor. Los sistemas comerciales pueden generar datos confiables en el caso de defectos más grandes que 1 mm. Una variación reciente de esta técnica, donde se usan múltiples emisores de ondas ultrasónicas (*Phased Ultrasonic Arrays*) puede crear resultados confiables en el caso de defectos mayores a 20  $\mu\text{m}$  (Schubert, Hipp, & Gommlich, 2014). Además del tamaño, el mayor obstáculo para usar esta técnica de detección es el hecho de que la confiabilidad necesaria a nivel industrial del UT solo puede ser lograda si el espécimen es sumergido en agua (Safi, Akanda, Sadique, & Alam, 2014), para la propagación más efectiva de las ondas ultrasónicas generadas. Dicha condición es imposible para el EGR dP, debido a dos potenciales problemas:
  - Corrosión afectando las diferentes interfaces.
  - Agua infiltrada en la cavidad que tiene aceite. Estas piezas operan a temperaturas arriba de los 100°C, si se tiene agua en la cavidad, esta se convertirá en vapor de agua durante la operación, incrementando en más de 300% la presión interna y por ende inutilizando el sensor.
- *Eddy Current* (EC). En este método se mide la magnitud y la fase de un voltaje en corriente alterna suministrado por un oscilador a través de una bobina, cuando dicha bobina se coloca junto a la pieza a ser probada. Cuando la bobina se mueve relativa al objeto, se pueden producir cambios en los componentes del voltaje como resultado de las propiedades eléctricas o magnéticas del objeto, que a su vez pueden ser el resultado de

cambios en la estructura, dureza o composición del material (es decir, posibles defectos). Las corrientes inducidas tienen una forma similar al flujo circular provocado en una corriente de agua (conocido como *Eddy*) (Blitz, 1987). Los sistemas de EC solo son confiables en rangos de defectos mayores a 1 mm (Ghoni, Dollah, Sulaiman, & Ibrahim, 2014; Lahdenperä, 2015).

- *Acoustic Emission Testing* (AE). Cuando a una estructura se le proporciona energía, si se produce un movimiento interno, se da la emisión de ondas elásticas a través del material, concéntricas a la fuente del cambio en la estructura interna (Gholizadeh, 2016). Aunque este método, con la instrumentación adecuada, puede detectar defectos en el orden de 10 pm (Center, 2014), se basa en la detección de la energía liberada cuando una interfaz entre materiales cambia al ser sometida a un estrés mecánico y solamente "escucha" el fenómeno (Beattie, 1983). Por lo tanto, la AE es útil en el caso de la detección de un defecto provocado por un evento posterior a la unión de los materiales, no un defecto ya presente, además de requerir instrumentación permanentemente unida a la pieza estudiada. El tamaño del EGR dP en este caso también complicaría la implementación de esta NDT de forma considerable.
- *Shearography* (una forma de Interferometría) es una donde un haz de laser es utilizado para crear patrones de reflejo, buscando interferencias que evidencien la presencia de defectos en el objeto inspeccionado (Hung & Ho, 2005). Esta y otras técnicas de inspección visual no pueden aplicarse a la prueba de la soldadura en cuestión: se ha comprobado que la presencia de rebaba (el aspecto externo) en esta soldadura no está correlacionada con una mala unión entre las superficies soldadas.

La revisión de la literatura concluye entonces que no existe una técnica ampliamente utilizada en la industria que permita probar la hermeticidad de manera efectiva (en tiempo y costo) de la interfaz 6.

La aproximación al problema debe ser entonces algo basado en las particularidades de la pieza bajo prueba. Se aprovechará pues el hecho de tener un elemento sensor de presión al interior del paquete.

Por lo tanto, la propuesta principal de este trabajo, para lograr una prueba confiable de hermeticidad en la interfaz 6, consta de los siguientes pasos:

- Asegurar mecánicamente el dispositivo a probar, de tal forma que se tenga un par de sellos alrededor de la parte externa de la interfaz 6, y al mismo tiempo se puedan conectar eléctricamente los pines que van unidos con el dado MEMS.
- Aplicar aire a una presión de aproximadamente 34.5 bar (3.45 MPa, ~500 psi) directamente a la parte externa de la interfaz 6, cuando al mismo tiempo se monitorea el voltaje de salida del dado MEMS.
- Si existe un canal de fuga en la interfaz 6, el aire entrará a la cavidad llena de aceite. Si la velocidad de entrada es suficientemente elevada como para superar la velocidad de absorción de aire del propio aceite (Lee & Foster, 1990), se creará una burbuja de aire dentro de la cavidad en un tiempo relativamente corto, causando un incremento de la presión interna que puede ser detectado de forma inmediata por el dado MEMS.
- Si no hay un canal de fuga significativo en la interfaz 6, no habrá un cambio interno de presión y el voltaje de salida del dado MEMS se conservará prácticamente constante (dentro de un rango de  $\pm 2$  mV) durante la prueba.

Desde el punto de vista de manufactura, las ventajas de esta propuesta son dos:

- Como se mostrará más adelante, es posible asegurar la pieza para aplicar la presión deseada sin causar daños estructurales al paquete.
- La instrumentación requerida para controlar la presión aplicada y monitorear la respuesta eléctrica del dispositivo es ampliamente disponible y no requiere adecuaciones complejas.

El valor de presión enunciado, 34.5 bar, se ha obtenido de la evidencia empírica (ver figura 28): todas las piezas rechazadas hasta el momento han sido confirmadas, de forma destructiva, aplicando este nivel de presión a la interfaz 6, después de retirar el diafragma y exponer la cara de la interfaz que en operación normal está en contacto con el aceite. Dicha confirmación se ha obtenido por la aplicación más "burda" del "método de la lata abierta" (Tao & Malshe, 2005), con la excepción de que ni siquiera fue necesario usar helio como medio para cruzar el canal de fuga: el aire presurizado fue detectado con una simple burbuja creada sobre un fluido, como se define en la especificación MIL-PRF-25567E ((NPFC), 1998).

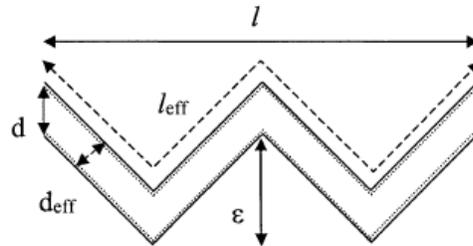


Figura 28: Fotografía de burbuja observada en prueba de fuga.  
Fuente: Elaboración propia.

Con la evidencia empírica mostrando que es posible introducir un gas en la cámara de aceite (si es que existe un canal de fuga), es aun necesario comprobar que el resultado esperado está alineado con la teoría disponible. Se debe comprobar que el flujo de aire, con la presión aplicada, será suficiente para introducir gas a la cámara de aceite para rebasar el ritmo de absorción de gas por el aceite, permitiendo la creación de mayor volumen en la cámara (una burbuja) y por lo tanto el cambio de presión que llevará a una respuesta diferente por parte del dado MEMS.

Para esto se usó una de las ecuaciones demostrada por Beck, et. al. (Beck et al., 2005). Donde para una grieta de apertura relativamente pequeña comparada

con el camino de fuga, el camino de fuga no traza una ruta "directa" de un extremo a otro, como se muestra en la figura 29:



Donde:

$l$ . Grosor de la estructura donde la grieta existe.

$L$ . Media del ancho de apertura de la grieta.

$\epsilon$ . Tamaño de grano del metal.

$_{eff}$ . (Subíndice) Ajuste de dimensiones de acuerdo a la geometría esperada.

$P$ . Presión aplicada.

$u$ . Velocidad media del flujo.

$\mu$ . Viscosidad del fluido.

$\rho$ . Densidad del fluido.

Figura 29: Esquemático para el cálculo del flujo a través de una grieta de apertura reducida comparada con su longitud.

Fuente: (Beck et al., 2005).

Se tiene que el valor del flujo será dominado por la viscosidad del gas:

$$0 = \frac{2u}{\rho} \left[ \frac{12\mu l_{eff}}{d_{eff}^2} \right] - \Delta P \quad (20)$$

De aquí, se deduce que el flujo de aire cambia de una forma no lineal con respecto al tamaño de la grieta, pero de forma lineal comparado con la presión

aplicada, como se muestra en la figura 30. En la gráfica, los colores representan el comportamiento del flujo de aire (considerado con las características físicas estándar para el aire a presión atmosférica) a través de grietas de diferentes tamaños de apertura. El eje horizontal es la presión aplicada y el eje vertical es el flujo esperado, en base a la ecuación anterior.

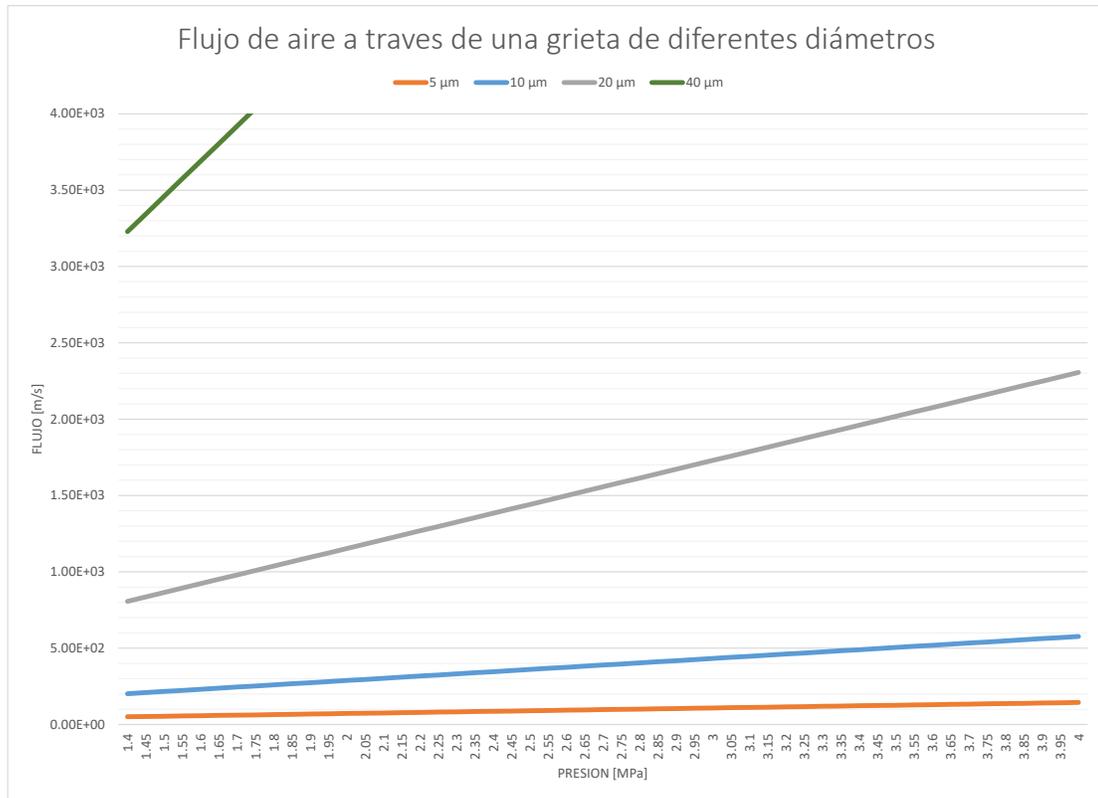


Figura 30: Flujos esperados aplicando aire a diferentes presiones, para diferentes tamaños de apertura.

Fuente: elaboración propia.

Los análisis metalográficos (Vander Voort, 1999) en piezas con fuga de aceite han encontrado grietas alrededor de los 10μm de ancho. Para la presión aplicada a través de los ensayos empíricos (cuando se comprobó la presencia de canales de fuga en rechazos de campo) de 34.5 bar, se tiene entonces una velocidad del flujo esperada de 504 m/s. Se concluye entonces que aun con una grieta de unos cuantos micrómetros de ancho, es posible introducir un volumen de más de 1 cc de aire en menos de 10 segundos dentro de la cavidad de aceite, siempre y cuando exista un camino de fuga. Es importante considerar que la inyección de

gas a este ritmo debe “vencer” el ritmo de absorción de aire por parte del aceite (difusión), en otras palabras, el aire inyectado a través del camino de fuga debe entrar a una velocidad suficiente para provocar la formación de una burbuja dentro de la cavidad. La medición directa de la difusión de aire en el aceite es compleja, y dicho parámetro varía considerablemente con la temperatura, por lo que se usa aquí una aproximación del coeficiente de difusión  $D$ , concretamente de oxígeno a temperatura ambiente, basada en el modelo estipulado en (Ding & Fan, 2011):

$$D_{O_2} = 15^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Afortunadamente en este caso la fuerte dependencia de la difusión de aire en el aceite a la temperatura puede ser considerada como una constante, ya que para efectos prácticos todas las pruebas serán hechas a temperatura ambiente. Este trabajo no pretende obtener un modelo matemático completo de la difusión de aire dentro de la cavidad de aceite del EGR dP, sino probar mediante la medición experimental si la suposición arriba estipulada (que la presión aplicada es suficiente para crear un flujo que cree una burbuja) concuerda con la realidad, a través de una medición indirecta proporcionada por el sensor MEMS dentro del paquete.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 EXPERIMENTO 1

Se construyó un prototipo, mostrado en la Figura 31, donde los pasos relatados anteriormente fueron aplicados. La pieza es sostenida en posición, se aplica entonces presión en la interfaz 6 y se aplican 5V a la entrada del puente de Wheatstone del dado MEMS. El voltaje de salida del dado MEMS, en mV, es monitoreado a través de una DAQ (tarjeta de adquisición de datos) de National Instruments, modelo NI6003, con una aplicación relativamente sencilla construida en LabVIEW®. Se recolectaron datos directamente a un archivo de texto, con la tarjeta configurada para recolectar un valor de voltaje en un rango de [0V – 15V] a un ritmo de una muestra cada 100 ms.

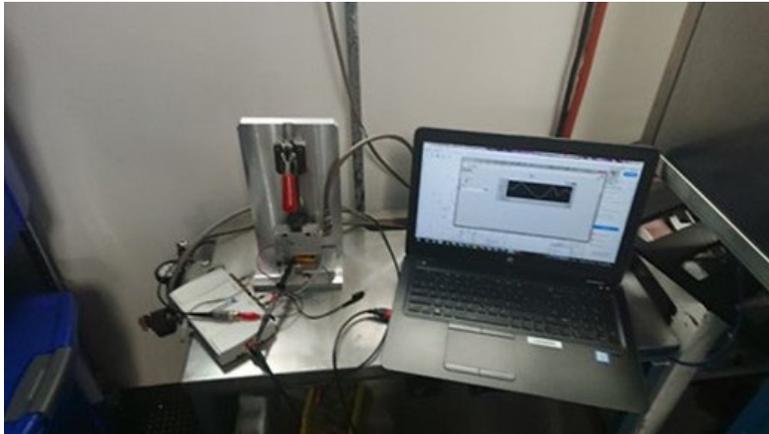


Figura 31. Prototipo para la aplicación de Prueba de Fuga.  
Fuente: elaboración propia.

El prototipo mostrado en la figura 31 es bastante rudimentario, se tuvieron que hacer varias iteraciones para poder obtener un sello que evitara una fuga considerable de aire cuando la pieza es sostenida en su lugar, no por la fuerza requerida, sino por lo cercano de los distintos elementos en la pieza a la interfaz 6, que hace que la superficie de sellado sea relativamente pequeña. Para crear el sello se usó un o-ring número 004 de acuerdo al estándar AS568 (Committee, 2020). La palanca manual es suficiente en este caso, dado que el área de sellado es aproximadamente  $1.26 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ , lo que considerando una presión de 34.5 bar

corresponde a una fuerza de 43.35 N. Para crear el contacto eléctrico se usaron cuatro contactares eléctricos conocidos coloquialmente como pogo pin, que es básicamente un émbolo metálico empujado por un resorte (T.-Y. Park, Kim, Kim, & Oh, 2018).

Para validar que el dispositivo de la figura 31 proporcionara mediciones confiables a pesar de su crudeza, se corrió lo que en la IA es conocido como un estudio de reproducibilidad y repetibilidad, o GR&R, que cuantifica la confiabilidad de un sistema de medición en base a repeticiones con diferentes condiciones iniciales (Deshpande, Ramya, Vishweshwar, Deshpande, & Roy, 2014). Los resultados se muestran resaltados en verde en la figura 32 y de acuerdo a los criterios aceptados en la IA (AIAG, 2010) son aceptables (es decir, podemos suponer que las mediciones serán lo suficientemente confiables como para distinguir diferencias estadísticamente significativas si se cambian las condiciones de las piezas bajo prueba).

### Gage R&R for Atm

Gage name:	Vout Test
Date of study:	22-Feb-2017
Reported by:	MO
Tolerance:	40
Misc:	GR&R Ball Weld Prototype Measurement

### Two-Way ANOVA Table with Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Piece	9	560.825	62.3138	1755.69	0.000
Nest	4	1.241	0.3102	8.74	0.000
Piece * Nest	36	1.278	0.0355	6.26	0.000
Repeatability	100	0.567	0.0057		
Total	149	563.910			

*a to remove interaction term = 0.05*

## Gage R&R Variance Components

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.02477	0.59
Repeatability	0.00567	0.14
Reproducibility	0.01910	0.46
Nest	0.00916	0.22
Nest*Piece	0.00994	0.24
Part-To-Part	4.15189	99.41
Total Variation	4.17666	100.00

Process tolerance = 40

## Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.15737	0.9442	7.70	2.36
Repeatability	0.07528	0.4517	3.68	1.13
Reproducibility	0.13820	0.8292	6.76	2.07
Nest	0.09570	0.5742	4.68	1.44
Nest*Piece	0.09971	0.5983	4.88	1.50
Part-To-Part	2.03762	12.2257	99.70	30.56
Total Variation	2.04369	12.2621	100.00	30.66

Number of Distinct Categories = 18

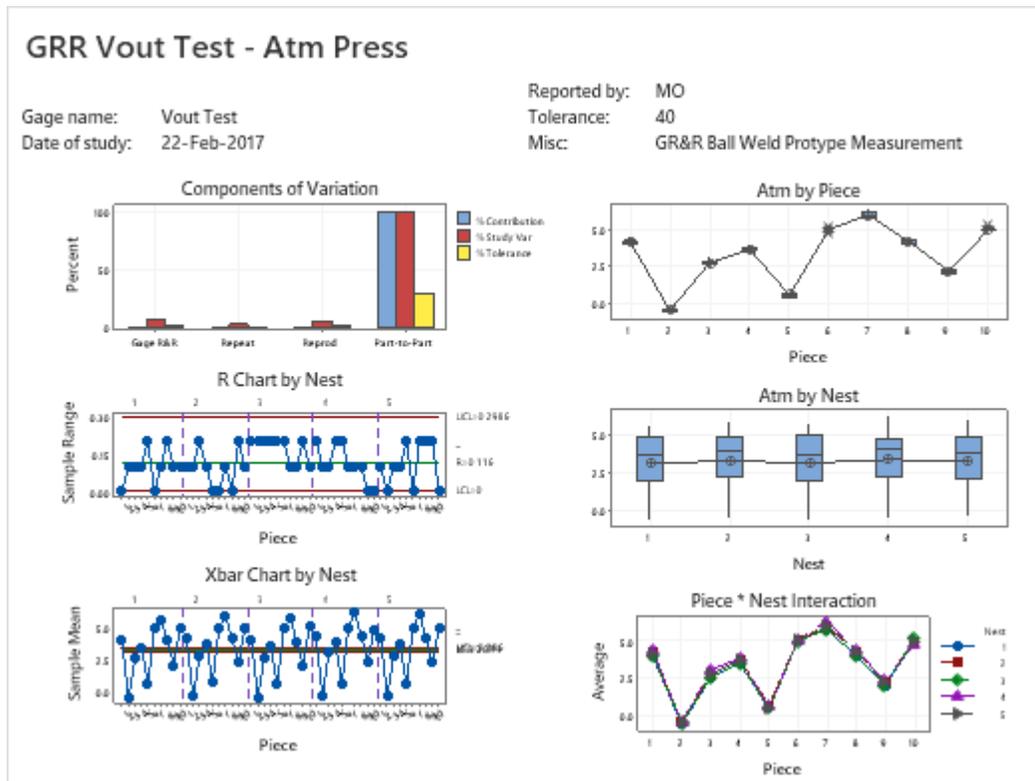


Figura 32. Prueba de validación del sistema de medición del Prototipo.  
Fuente: elaboración propia.

En la prueba mostrada en la figura 33, se tienen 3 piezas. Una pieza sin fuga de aceite, y dos piezas construidas intencionalmente con fugas de aceite. Estas piezas se construyeron alterando los parámetros de soldadura en la máquina de soldadura de balín, y luego fueron confirmadas como fuga de la manera siguiente:

- La pieza se coloca en un herramental diseñado para poder someter a presión los puertos del EGR dP.
- Se aplica presión en los puertos (aproximadamente 5 bar) de forma escalonada con presión atmosférica, 5 minutos en cada ciclo. Durante 5 minutos los puertos se encuentran a presión atmosférica, al termino de ese tiempo se abre una válvula de paso para inyectar 5 bar de presión al mismo tiempo en ambos puertos, después de 5 minutos se cierra la válvula de presión y se abre una válvula de ventilación. Este ciclo se repite mientras dure la prueba.

- Todo el conjunto, con las piezas montadas y bajo el ciclo de presión, se somete a un cambio de temperatura que va de los  $-30^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  a los  $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  durante 3 horas.
- Se repite este ciclo por 12 horas.

Este ciclado de temperatura y presión somete a un estrés importante todas las interfaces del EGR dP. Si una interfaz no puede realizar el trabajo de sellar la cavidad de aceite, después del ciclado la pieza puede ser inspeccionada visualmente y rastros de aceite fuera de la cavidad pueden ser encontrados.

Los pasos listados anteriormente forman parte de las pruebas de validación demandadas en la IA, para garantizar que los sensores utilizados soporten las condiciones esperadas de uso. Se ha usado aquí para validar que las piezas utilizadas en los experimentos son piezas donde la interfaz 6 tiene una falla de hermeticidad.

Volviendo a la prueba experimental, la figura 33 muestra que el voltaje de salida del dado MEMS ha cambiado significativamente en las piezas con falla (en naranja y azul), mientras que la pieza sin falla (en gris) permanece con un voltaje prácticamente constante. La oscilación mostrada en la gráfica es ruido eléctrico derivado de las condiciones experimentales, en particular la naturaleza portátil de la DAQ.

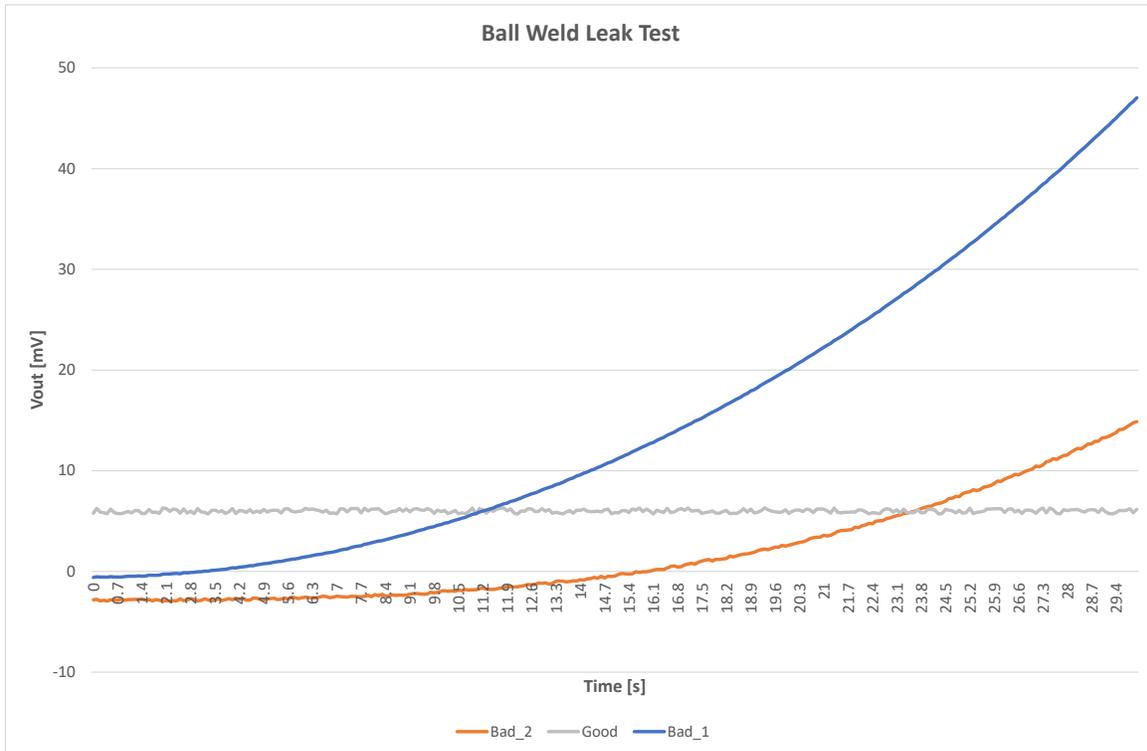


Figura 33: Prueba de hermeticidad como se define en este trabajo. Las piezas con fuga fueron detectadas como una alteración del voltaje de salida.  
Fuente: elaboración propia.

## 4.2 EXPERIMENTO 2

Se replicó el Experimento 1 con una cantidad mayor de piezas:

- Grupo 1: 30 piezas de control (sin fuga).
- Grupo 2: 10 piezas de prueba (con parámetros alterados en el controlador de soldadura, para producir piezas con fuga).

Todas las piezas fueron probadas en el prototipo, y después de la prueba fueron sometidas al ciclado térmico descrito en el Experimento 1. Todas las piezas con fuga manifestaron pérdida de aceite y todas las piezas de control no mostraron alteraciones después del ciclado térmico.

En términos estadísticos, se muestra abajo el resultado del Experimento 2, después de aplicar presión de aire en la interfaz 6 por 10 segundos en el prototipo. Existe una diferencia estadísticamente significativa ( $\alpha = 95\%$ ) entre las piezas de control y

las piezas de prueba. La diferencia entre el máximo valor obtenido del Grupo 1 y el mínimo valor del Grupo 2 también es importante: muestra que hay una región relativamente amplia donde no se esperan resultados, permitiendo colocar el límite de aceptación de una prueba sistemática relativamente cerca ( $\sigma = 5$ ) de la distribución esperada en el Grupo.

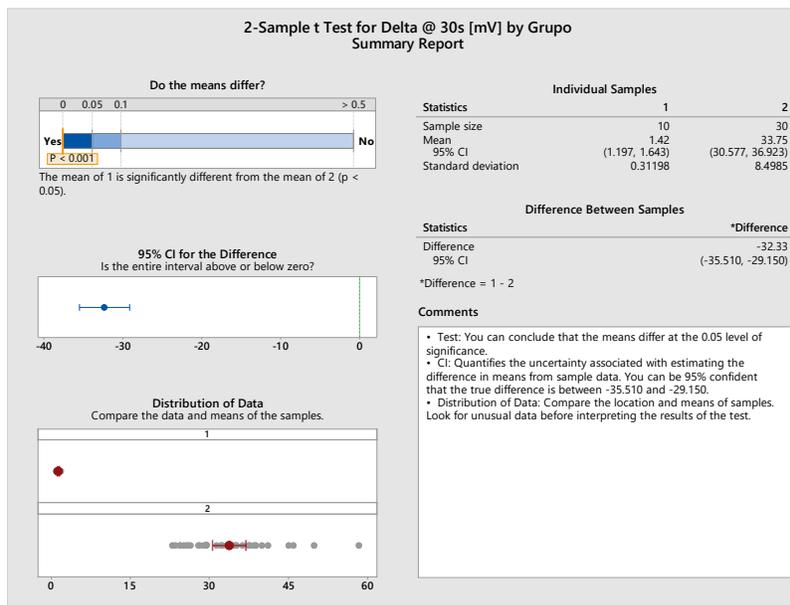
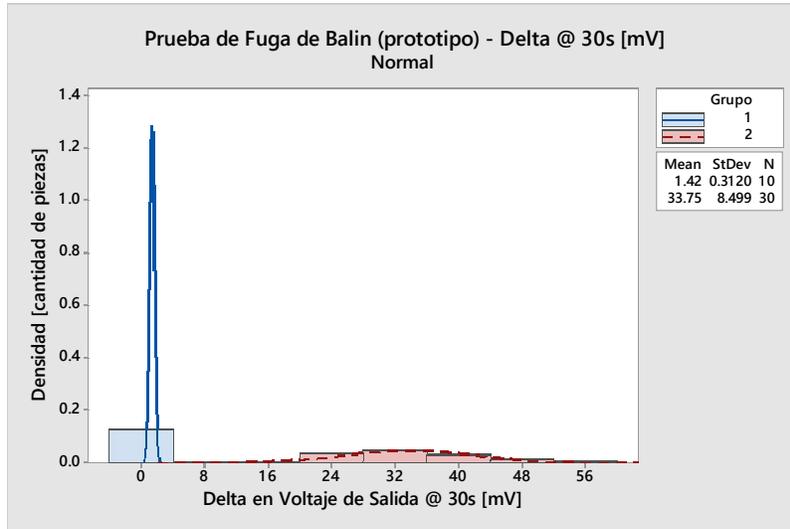


Figura 34: Resultados estadísticos del Experimento 2.  
Fuente: elaboración propia

### 4.3 EXPERIMENTO 3

Para determinar un umbral razonable de aceptación de una prueba de fuga con el método propuesto, se replicó el Experimento 2 con piezas creadas con un método adicional para obtener piezas con fuga: intencionalmente se dañó la parte del soporte del balón previo a la soldadura, como se ilustra en la figura 35. Las piezas fueron probadas durante 30 segundos cada una.

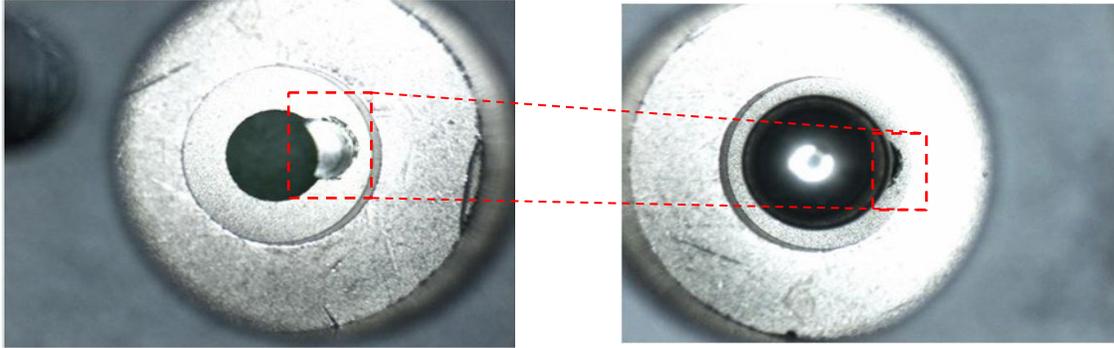


Figura 35: Sección dañada de forma intencional para crear una pieza con fuga de aceite.  
Fuente: elaboración propia.

Todos los daños en las piezas de los experimentos fueron creados en el HS del EGR dP. Al ser la pieza un sensor de diferencial de presión, la dirección del cambio de voltaje en la prueba queda determinada por cuál de las dos cavidades incrementando la presión, es decir, si se dañara la pieza para que hubiera un camino de fuga en el LS, el cambio de voltaje sería negativo. Los cambios de voltaje medidos en el Experimento 3 se muestran en la figura 36: las líneas en verde representan el voltaje de las piezas de control, y las líneas en azul son el voltaje de las piezas de prueba. Algunas piezas alcanzan el valor de saturación del dado MEMS (el valor donde la membrana no puede flexionarse más), por eso se observan como líneas rectas al llegar a cierta región de la escala. Como puede notarse, el ritmo del cambio de voltaje no es uniforme. Como se dijo anteriormente, no se pretende obtener un modelo matemático completo del cambio de voltaje cuando entra gas en la cavidad de aceite, dado que no pasaría de ser un ejercicio teórico, ya que no hay forma de medir experimentalmente el tamaño de la burbuja de aire creada dentro del paquete en paralelo a cuando se introduce aire en la cavidad. Existe una prueba destructiva donde es posible inspeccionar visualmente una burbuja de aire saliendo de la cavidad, pero la medición precisa de las dimensiones de dicha burbuja representa un problema de instrumentación bastante complejo y no necesariamente arrojaría información adicional significativa.

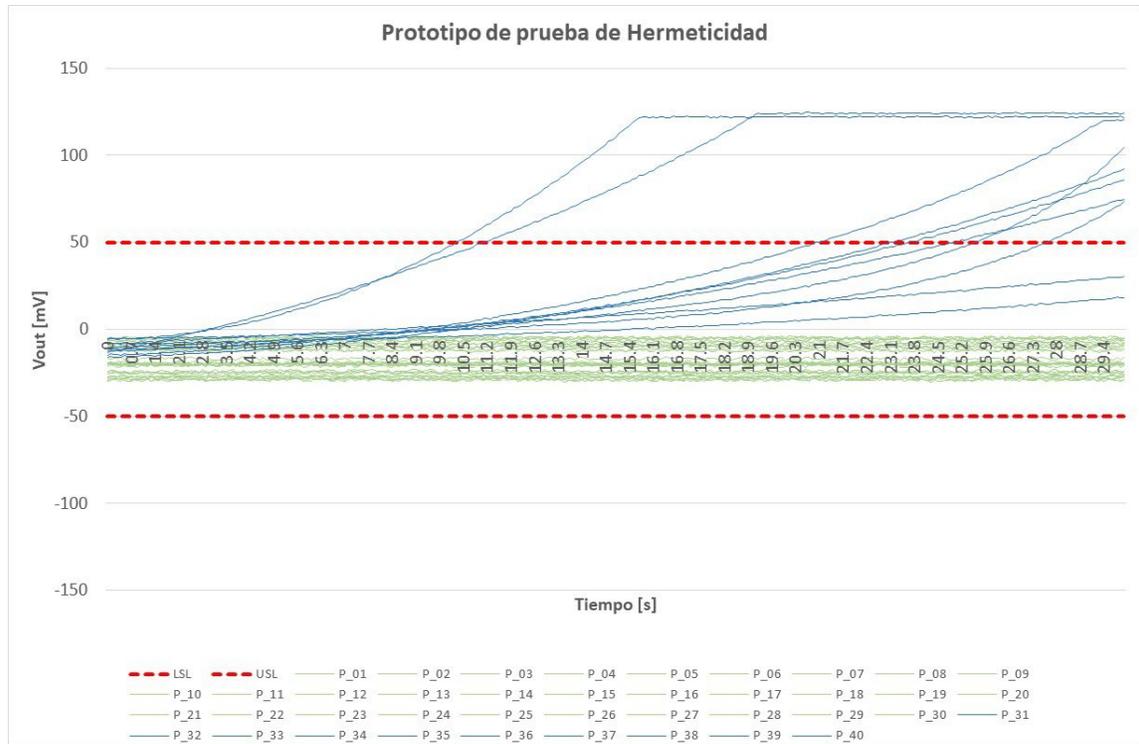


Figura 36: Voltajes de salida de los grupos de Control y de Prueba durante 30 segundos. Fuente: elaboración propia.

Se tiene ya el valor de presión aplicada en la prueba (34.5 bar), la fuerza necesaria para sostener la pieza en su lugar sin crear una fuga adicional (> 100 N, dado que se presurizan los dos lados al mismo tiempo), y el voltaje aplicado al dado MEMS (5 V). Falta determinar dos parámetros de prueba:

- El tiempo que la pieza será sometida a la prueba.
- El nivel de cambio de voltaje de salida del dado MEMS considerado como inaceptable.

Se tomó entonces la diferencia de voltaje entre el valor inicial y el valor de cada pieza cada 5 segundos. Los resultados de esas mediciones, etiquetadas como Delta\_Xs, se listan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Valores de voltaje de salida de las piezas a diferentes tiempos durante la prueba de fuga en el Experimento 3.

Validación de Prueba de Hermeticidad. Datos en mV.								
Pieza	T = 0s (V <sub>inicial</sub> )	Delta_5s	Delta_10s	Delta_15s	Delta_20s	Delta_25s	Delta_30s	Grupo
P_01	-27.2146	0.0976	0.1388	0.0609	-0.0047	-0.0096	0.3851	Control
P_02	-24.5946	0.3076	1.4488	-0.3691	1.0053	-0.1496	0.3851	Control
P_03	-19.4746	-0.2024	0.1188	-0.2291	-1.2647	-0.0596	0.6151	Control
P_04	-20.5346	0.6776	0.9488	0.0909	0.8953	-0.6196	0.7351	Control
P_05	-28.9146	-0.0724	0.8588	0.0709	-0.2247	1.3204	1.5051	Control
P_06	-8.8646	1.7376	1.6788	1.2909	1.2153	0.3304	1.1851	Control
P_07	-16.5646	0.2876	-0.6112	-0.4791	-1.5947	-1.1496	0.6651	Control
P_08	-29.8746	1.0876	1.1288	0.3109	0.8353	-0.0696	0.9251	Control
P_09	-19.7746	-1.2624	0.1588	-0.9591	-0.8547	-1.3896	-0.0849	Control
P_10	-6.9046	0.9776	0.1588	1.5409	0.1053	0.9204	0.3651	Control
P_11	-24.9046	-0.1524	0.3588	-0.1591	-1.0747	-0.4696	0.7051	Control
P_12	-27.9646	0.3076	0.5388	-0.0391	0.7253	-0.5996	0.4351	Control
P_13	-11.4546	-0.7124	-0.9012	0.2309	0.2353	-1.5096	0.5351	Control
P_14	-10.1546	0.3276	-0.1512	-0.1891	-0.7247	-1.0496	1.2751	Control
P_15	-9.5246	-0.1624	-0.3912	-0.0991	0.0153	-0.4896	1.5951	Control
P_16	-12.7446	0.9576	1.2688	-0.0191	0.8253	1.4204	0.9651	Control
P_17	-27.6046	0.5776	1.4088	0.7209	1.3453	0.8704	1.2751	Control
P_18	-5.2146	0.3076	0.8888	0.9609	0.3253	0.0004	-0.0149	Control
P_19	-19.2246	1.0776	1.0988	0.7109	0.1553	-0.2196	-0.5049	Control
P_20	-19.2446	-0.3424	-1.5712	-0.2691	-1.0447	-1.9496	-0.6049	Control
P_21	-21.3146	0.0576	-0.3512	0.0309	-0.1347	-0.5596	0.2951	Control
P_22	-24.4846	0.0076	0.3488	-0.1791	-0.4247	-0.4196	-1.0049	Control
P_23	-10.7446	1.1976	1.3188	1.3609	1.2353	0.1204	1.1651	Control
P_24	-4.7346	0.4676	-0.5712	0.5809	-0.9347	0.4004	0.0451	Control
P_25	-20.5646	-0.1724	0.3488	0.5409	0.3653	-0.5896	0.3951	Control
P_26	-20.1346	0.1576	-0.5912	-0.1991	-0.0047	0.4904	0.2751	Control
P_27	-29.5646	-0.1024	0.2388	1.0209	1.0253	0.0204	0.4951	Control
P_28	-25.8446	1.1776	0.9588	0.4209	1.4853	1.4504	1.6351	Control
P_29	-6.4246	-0.1124	-0.9212	-0.0791	-0.4747	-1.5296	-1.0649	Control
P_30	-4.7746	-0.1124	-1.2512	-0.0991	-0.4647	-0.7896	-0.4949	Control
P_31	-16.3245	5.1892	15.2018	30.4695	50.7164	76.0437	108.2966	Test
P_32	-10.6035	4.0511	10.3274	19.8107	32.7668	56.1562	114.9765	Test
P_33	-12.4359	4.2979	13.1395	25.5620	41.7368	62.1723	87.1875	Test
P_34	-13.3524	23.7234	55.0917	94.8084	137.1938	137.6618	137.3892	Test
P_35	-15.0224	5.8262	17.3061	34.7416	59.3528	92.0096	135.2426	Test
P_36	-8.50986	4.7154	10.1513	16.2821	22.9400	30.0938	38.9880	Test
P_37	-8.68986	1.9654	4.4313	8.2121	13.0800	19.3038	26.9880	Test

P_38	-5.69386	2.0701	5.1635	10.2238	19.3890	37.4006	79.0079	Test
P_39	-11.4519	3.5120	12.2713	25.7516	44.3921	67.9079	97.3171	Test
P_40	-5.81741	13.5831	52.5169	116.3111	128.1313	127.8591	127.5542	Test

Fuente: elaboración propia.

Abajo se muestran las distribuciones del grupo de Control y el grupo de Prueba. De la inspección visual de los gráficos de caja y los intervalos de confianza se colocó una referencia arbitraria de 5 mV en el Delta. Es claro que las distribuciones del grupo de Control son relativamente compactas, pero el umbral de aceptación debe tomar en cuenta la variación de las piezas malas, para evitar la posibilidad de generar tanto falsos positivos como falsos negativos (Qian, Refsnider, Moore, Kramer, & Streby, 2020).

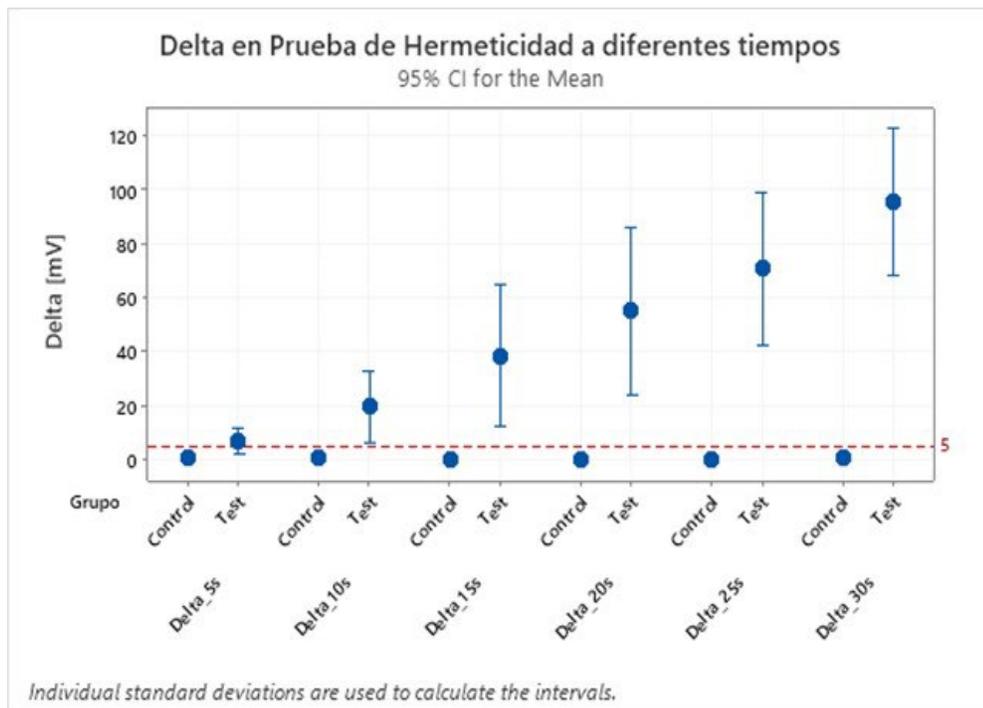
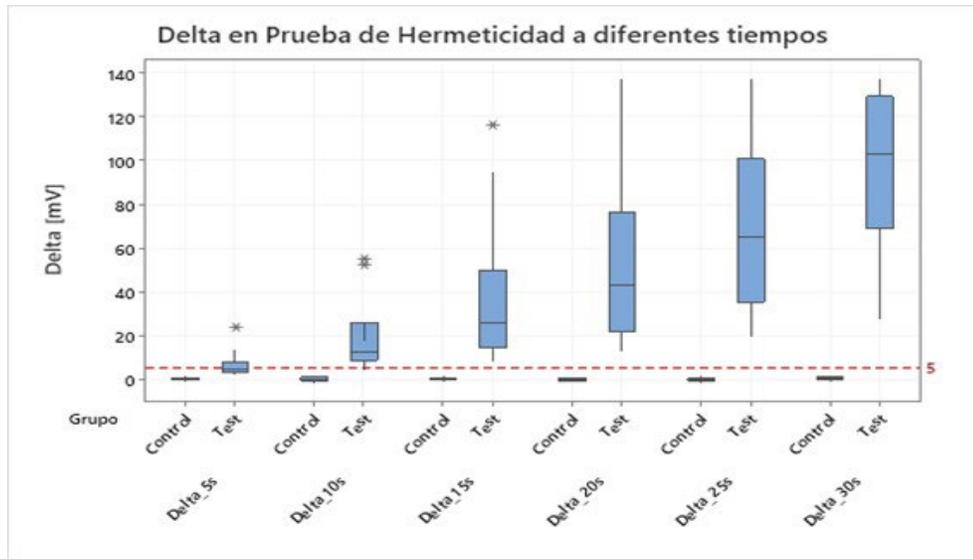


Figura 37: Distribuciones de voltajes de salida de los grupos de Control y de Prueba a diferentes tiempos.

Fuente: elaboración propia.

Abajo se muestra el análisis estadístico de los diferentes grupos en los distintos tiempos. Está claro que estadísticamente desde el grupo de 5 segundos hay diferencias significativas, pero la posibilidad de traslape de resultados se desvanece en el grupo de 15 segundos. Dado que se está determinando la

variación con un grupo relativamente pequeño de piezas, la recomendación es colocar un tiempo de prueba de 20 segundos y un umbral de rechazo del delta entre mediciones de 5 mV.

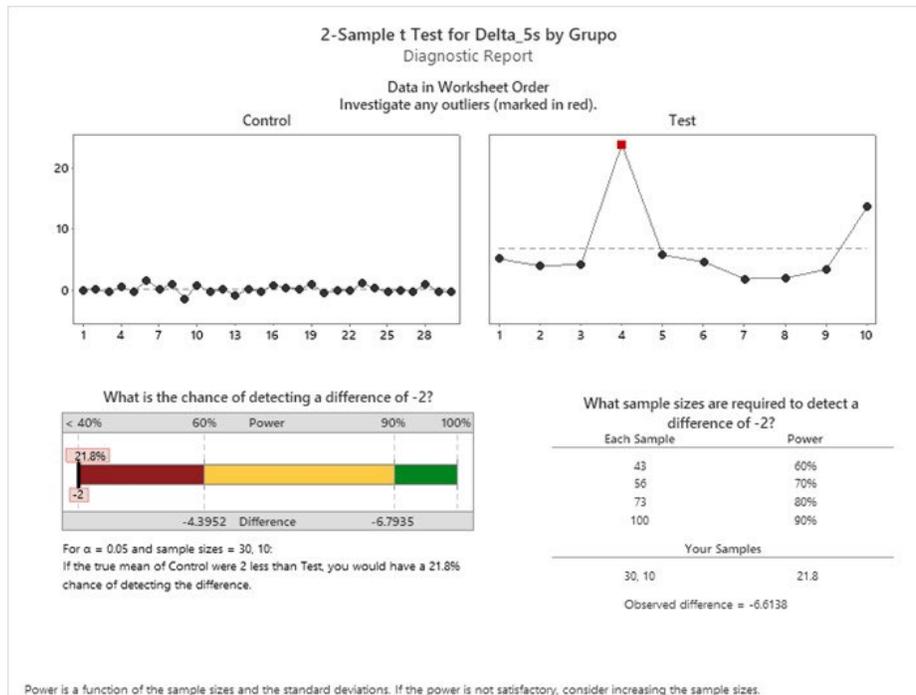
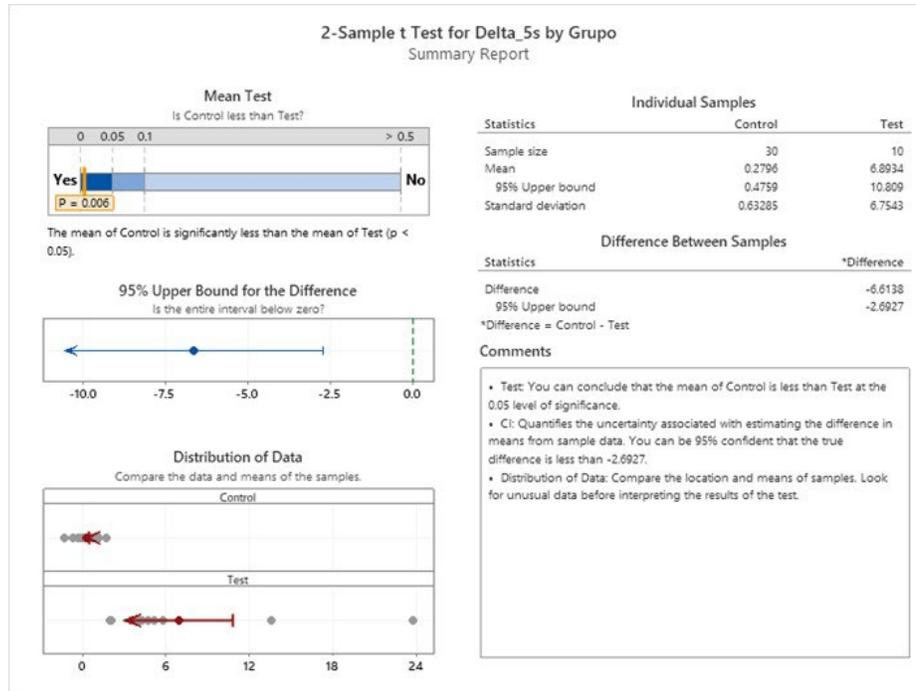


Figura 38: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 5 segundos.  
Fuente: elaboración propia.

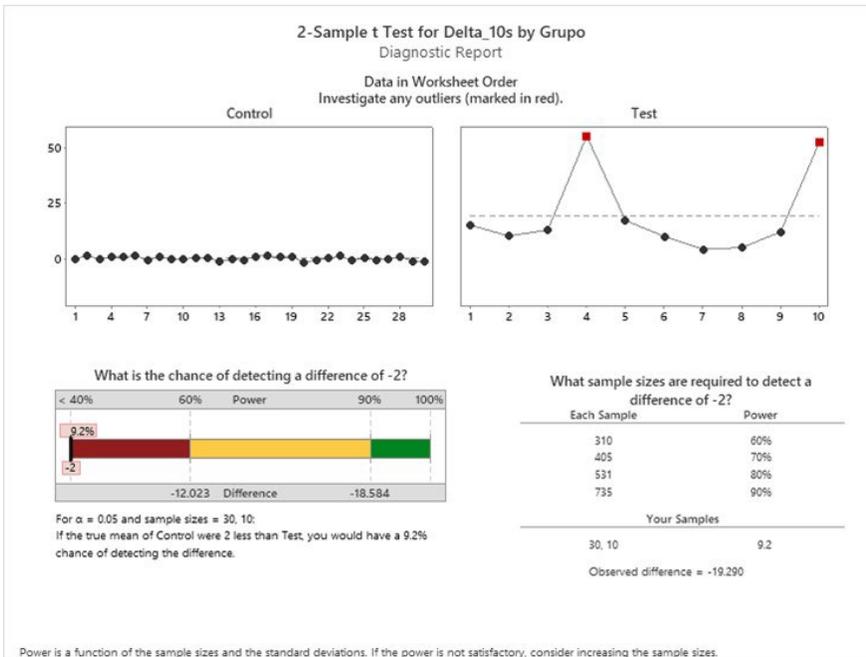
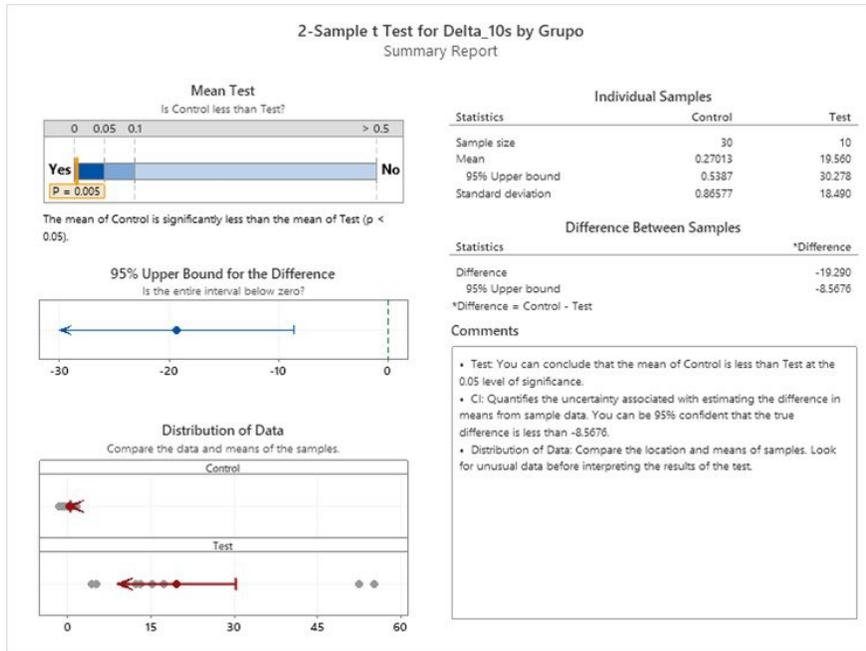


Figura 39: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 10 segundos.

Fuente: elaboración propia.

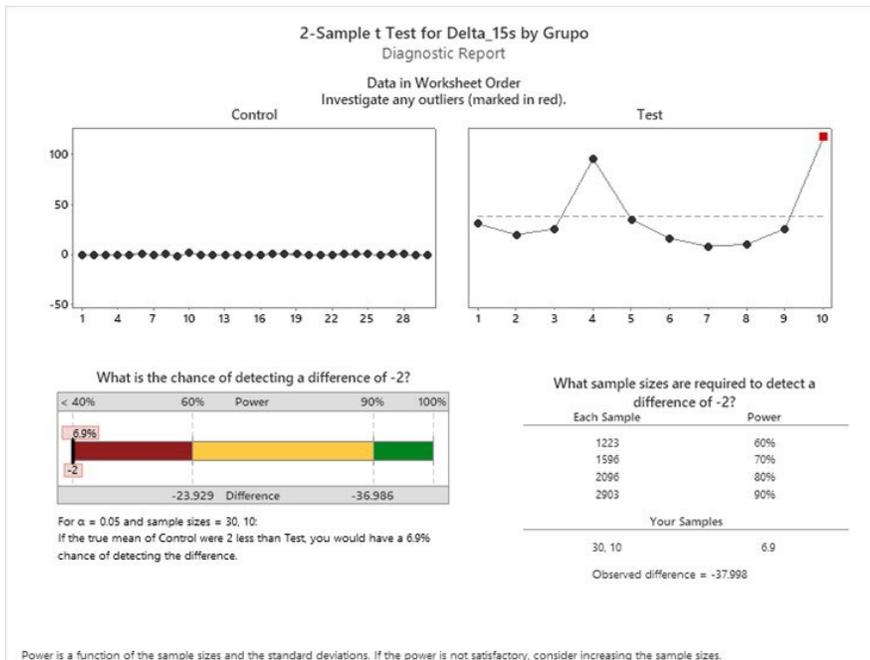
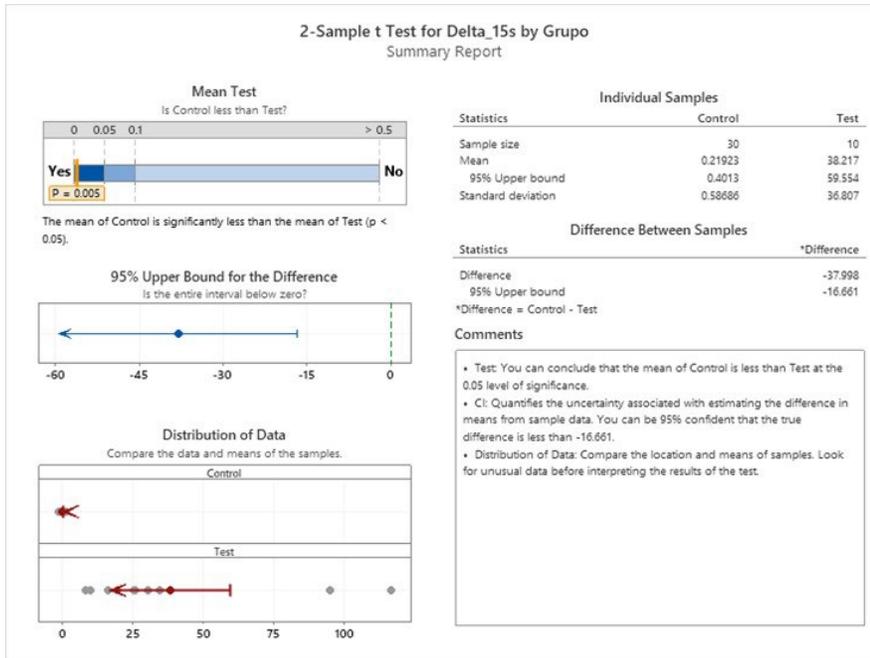


Figura 40: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 15 segundos.  
Fuente: elaboración propia.

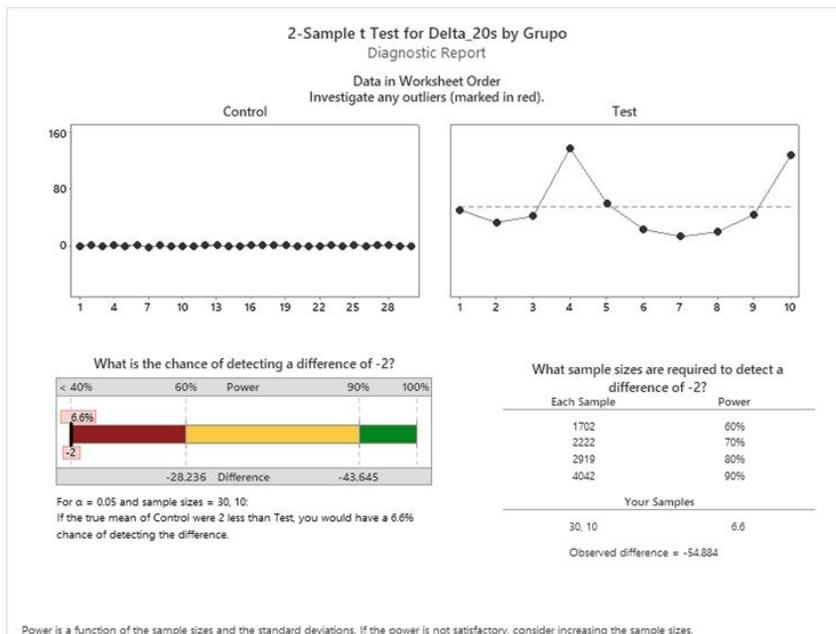
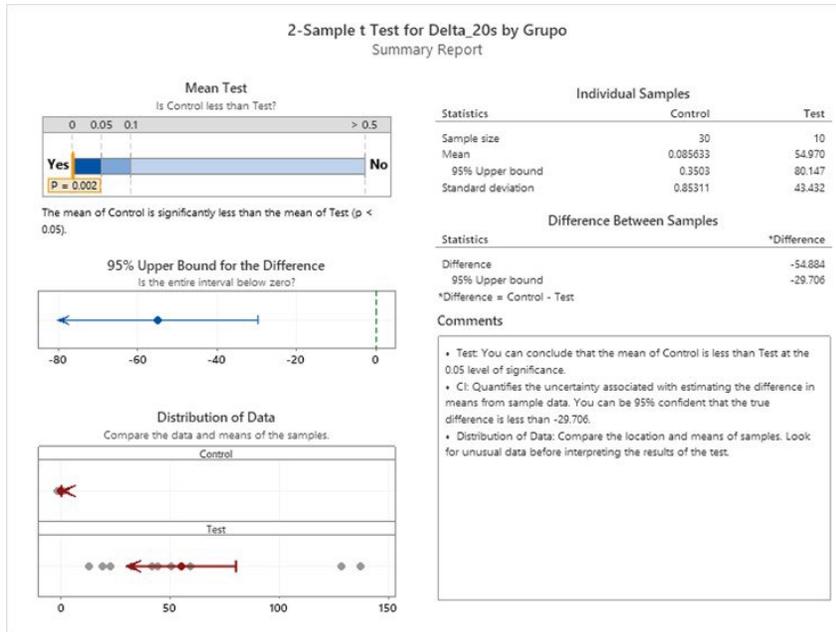


Figura 41: Diferencia estadística entre los grupos de Control y de Prueba a 20 segundos.  
Fuente: elaboración propia.

#### 4.4 SIGUIENTE PASO: DESARROLLO DE MÁQUINA DE PRODUCCIÓN

Con base en los resultados obtenidos en los Experimentos, se determina que es posible construir una máquina que utilice el principio de prueba explicado en este trabajo. Dado que se requieren 20 segundos como mínimo de tiempo de prueba, y con los datos de la demanda de producción estimada para los próximos 5 años, se sabe que es posible satisfacer dicha demanda con un equipo que aplique la prueba a 4 piezas simultáneamente. Abajo los primeros bosquejos del cabezal de prueba en una eventual máquina para probar el 100% de sensores EGR dP.

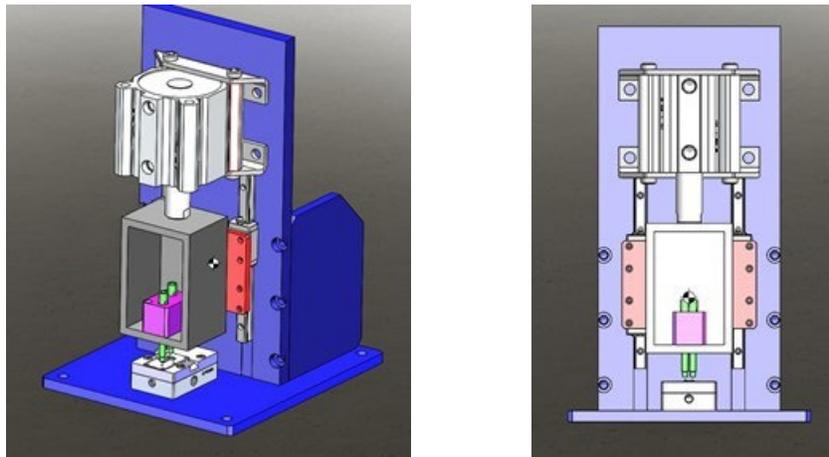


Figura 42: Bosquejo inicial del cabezal de prueba para una eventual máquina de producción.

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- La diferencia estadísticamente significativa en los resultados experimentales demuestra que es posible detectar piezas con potenciales canales de fuga de aceite en el EGR dP, a través del método propuesto en este trabajo.
- En el caso de que se quisiera tener esta prueba disponible para el 100% de las piezas, se puede esperar una detección confiable (como se define en la IA (Čepová, Kovacikova, Cep, Klapuť, & Mizera, 2018)) de las piezas afectadas por una posible fuga de aceite, dada la significativa diferencia en los mínimos y máximos valores de los dos grupos de las piezas (con y sin canal de fuga de aceite) probados en los experimentos.
- El tiempo de prueba de 20 segundos, la presión de prueba de 34.5 bar y el voltaje de salida en mV hacen que sea factible la construcción de una máquina de producción en masa que utilice los parámetros determinados en este trabajo.
- Las desventajas del método expuesto son dos:
  - Dado que la presión solo puede ser aplicada por un lado de la interfaz 6, el balín ya soldado puede ser empujado hacia la base metálica al mismo tiempo que se presuriza la prueba, con el riesgo de que se cierre el camino de fuga. Esta es una desventaja inherente en muchos métodos de fuga (Howl & Mann, 1965) y no puede evitarse dada la geometría de la pieza.
  - No se observó durante la fase experimental, pero en teoría existe el riesgo de que el camino de fuga sea tan estrecho que solamente se inyecte una mínima cantidad de aire en la cavidad de aceite, y la pieza sobreviva a la prueba. El aire adicional puede crear problemas de funcionalidad a la pieza que no necesariamente serían detectados dentro de la línea de producción.

## RECOMENDACIONES

- Desde el punto de vista de Aseguramiento de la Calidad, se debería construir una máquina que probara al 100% las piezas del EGR dP, con el método propuesto en este trabajo
- Es posible aprovechar la técnica aquí descrita (usar la capacidad de medición del sensor de presión dentro del paquete), para probar otros sensores de presión, siempre y cuando el elemento sensor se encuentre confinado en una cámara hermética, sin necesidad de utilizar más recursos que aire presurizado y medición de voltaje/corriente, que es una característica muy común en los sensores de presión usados en la IA.

## **APORTACION DE LA TESIS**

Este trabajo demuestra la viabilidad de una prueba de fuga no destructiva que puede ser aplicada en diferentes sensores de presión además del EGR dP. El principal requisito para poder aplicar la técnica aquí descrita es la presencia de un elemento sensor de presión al interior del paquete, que es una característica muy común en los sensores de presión usados en la Industria Automotriz. El hecho de que la instrumentación necesaria para la aplicación de la prueba sea solamente lo requerido para medir un voltaje y de que el medio de presurización pueda ser aire hace que la industrialización del método sea de relativo bajo costo, a comparación de métodos más tradicionales de Prueba de Fuga, que en muchos casos requieren el manejo de gases inertes y equipos especializados para su detección. En particular, el método permite evitar el uso de un espectrómetro para detección de Helio, que puede ser 10 veces más costoso que un equipo de adquisición de datos para la medición de voltaje. La construcción de una maquina basada en este método ya está programada para dar servicio en la línea de producción del EGR dP.

## **APORTACION SOCIAL DE LA TESIS**

El uso de gases inertes (como el helio y el nitrógeno) para la realización de Pruebas de Fuga es muy extendido en la Industria Automotriz, al punto que es la mayoría de los proyectos es la primera y única opción explorada cuando surge la necesidad de probar hermeticidad en cualquier pieza moldeada, maquinada o ensamblada. Los impactos ambientales negativos del exceso de Nitrógeno en la atmosfera son múltiples (Itoh et al., 2021; Paerl & Scott, 2010). El Helio es un recurso no renovable que escapa de la atmosfera una vez expuesto al aire (Mohr & Ward, 2014). Este trabajo presenta una alternativa para evitar el uso de cualquiera de esos gases en un proceso de manufactura. El EGR dP es usado en sistemas de reducción de emisiones contaminantes, este trabajo permite crear un punto adicional de control de calidad en su fabricación y por lo tanto su confiabilidad de operación en campo.

## REFERENCIAS

- (NPFC), M. a. G. S. S. N. P. a. F. C. (1998). Leak Detection Compound, Oxigen Systems Type I, 1 to 70°C (33 to 158°F).
- Abernethy, R. B. (1996). *The new Weibull handbook*: RB Abernethy.
- Agu, C. E., Hjulstad, Å., Elseth, G., & Lie, B. (2017). Algorithm with improved accuracy for real-time measurement of flow rate in open channel systems. *Flow Measurement and Instrumentation*, 57, 20-27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.08.008>
- AIAG. (2010). Measurement Systems Analysis. <https://www.aiag.org/store/publications/>: Automotive Industry Action Group.
- Amico, A. D., & Natale, C. D. (2001). A contribution on some basic definitions of sensors properties. *IEEE Sensors Journal*, 1(3), 183-190. doi:10.1109/JSEN.2001.954831
- Aziz, T., Fan, H., Khan, F. U., Haroon, M., & Cheng, L. (2019). Modified silicone oil types, mechanical properties and applications. *Polymer Bulletin*, 76(4), 2129-2145. doi:10.1007/s00289-018-2471-2
- Basurto Álvarez, R. (2013). Estructura y recomposición de la industria automotriz mundial. Oportunidades y perspectivas para México. *Economía UNAM*, 10(30), 75-92. doi:10.1016/s1665-952x(13)72204-7
- Baum, E. B., & Haussler, D. (1989). What Size Net Gives Valid Generalization? *Neural Computation*, 1(1), 151-160. doi:10.1162/neco.1989.1.1.151
- Beattie, A. G. (1983). *Acoustic emission, principles and instrumentation*. Retrieved from United States: <https://www.osti.gov/biblio/6309755>
- Beck, S. B. M., Bagshaw, N. M., & Yates, J. R. (2005). Explicit equations for leak rates through narrow cracks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82(7), 565-570. doi:10.1016/j.ijpvp.2004.12.005
- Blitz, J. (1987). Eddy current testing of metals. *Materials & Design*, 8(6), 340-345. doi:[https://doi.org/10.1016/0261-3069\(87\)90084-7](https://doi.org/10.1016/0261-3069(87)90084-7)

- Blumberg, F. P. S. C. a. K. (2016). Costs of emission reduction technologies for heavy-duty diesel vehicles. *The International Council on Clean Transportation White Papers*(2016.02.29), 39.
- Bo, W., De Coster, J., Simone, S., Wevers, M., & De Wolf, I. (2014). A Systematical Method to Determine the Internal Pressure and Hermeticity of MEMS Packages. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 23(4), 862-870. doi:10.1109/JMEMS.2014.2307391
- Center, N. E. R. (2014). Acoustic Emission Testing: Iowa State University.
- Čepová, L., Kovacikova, A., Cep, R., Klaput, P., & Mizera, O. (2018). Measurement System Analyses - Gauge Repeatability and Reproducibility Methods. *Measurement Science Review*, 18, 20-27. doi:10.1515/msr-2018-0004
- Committee, A.-C. S. (2020). Aerospace Size Standard for O-Rings: SAE International.
- Contreras, O. F., Carrillo, J., & Alonso, J. (2012). Local Entrepreneurship within Global Value Chains: A Case Study in the Mexican Automotive Industry. *World Development*, 40(5), 1013-1023. doi:10.1016/j.worlddev.2011.11.012
- Cornelius, D. J., & Monroe, C. M. (1985). The unique properties of silicone and fluorosilicone elastomers. *Polymer Engineering & Science*, 25(8), 467-473. doi:<https://doi.org/10.1002/pen.760250807>
- Costello, S., Desmulliez, M. P. Y., & McCracken, S. (2012). Review of test methods used for the measurement of hermeticity in packages containing small cavities. *Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, 2(3), 430-438. doi:10.1109/TCPMT.2011.2176122
- Chollet, F., & Liu, H. (2016). *A (not so) short introduction to Micro Electro Mechanical Systems*
- D., I. A. (2018). Wafer Fabrication Data | Analog Devices. *Details of Reliability Calculations*, 1(1), 2.
- Dar, T., Suryanarayanan, K., & Geisberger, A. (2014). No Physical Stimulus Testing and Calibration for MEMS Accelerometer. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 23(4), 811-818. doi:10.1109/JMEMS.2013.2294562
- Das, K., & Roy, S. (2016, 23-25 Jan. 2016). *Simulation and analytical study of MEMS based piezoresistive pressure sensor*. Paper presented at the 2016

- International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom).
- De, W., Jourdain, A., De Moor, P., Tilmans, H. A. C., & Marchand, L. (2007, 11-13 July 2007). *Hermeticity Testing and Failure Analysis of MEMS Packages*. Paper presented at the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2007. IPFA 2007. 14th International Symposium on the.
- Deshpande, A. A., Ramya, A., Vishweshwar, V., Deshpande, G. R., & Roy, A. K. (2014). Applications of Gage Reproducibility & Repeatability (GRR): Understanding and Quantifying the Effect of Variations from Different Sources on a Robust Process Development. *Organic Process Research & Development*, 18(12), 1614-1621. doi:10.1021/op5002935
- Diesel, R. (1895). Method of and Apparatus for Converting Heat into Work. (US542846A), 5.
- Ding, C., & Fan, Y. (2011). Measurement of Diffusion Coefficients of Air in Silicone Oil and in Hydraulic Oil. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19(2), 205-211. doi:[https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(11\)60155-9](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(11)60155-9)
- Eckerle, W., Sujana, V., and Salemme, G. (2017). Future Challenges for Engine Manufacturers in View of Future Emissions Legislation. *9th AVL International Commercial Powertrain Conference*(SAE Technical Paper 2017-01-1923), 29. doi:<https://doi.org/10.4271/2017-01-1923>
- ECOPoint, I. (2018). Tailpipe Emission Standards. *Federal Standards (US EPA)*, 2018.04.
- Ekelof, S. (2001). The genesis of the Wheatstone bridge. *Engineering Science & Education Journal*, 10(1), 37-40. Retrieved from [https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/esej\\_20010106](https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/esej_20010106)
- Eroglu, S., Duman, I., Ergenc, A., and Yanarocak, R. (2016). Thermal Analysis of Heavy Duty Engine Exhaust Manifold Using CFD. *SAE 2016 World Congress and Exhibition*(SAE Technical Paper 2016-01-0648), 8. doi:<https://doi.org/10.4271/2016-01-0648>
- Fonseca, D. J., & Sequera, M. (2011). On MEMS reliability and failure mechanisms. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 2011.

- Fujita, H. (1997, 26-30 Jan 1997). *A decade of MEMS and its future*. Paper presented at the Micro Electro Mechanical Systems, 1997. MEMS '97, Proceedings, IEEE., Tenth Annual International Workshop on.
- Genschel, U., & Meeker, W. Q. (2010). A Comparison of Maximum Likelihood and Median-Rank Regression for Weibull Estimation. *Quality Engineering*, 22(4), 236-255. doi:10.1080/08982112.2010.503447
- Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50-57. doi:<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>
- Ghoni, R., Dollah, M., Sulaiman, A., & Ibrahim, F. M. (2014). Defect Characterization Based on Eddy Current Technique: Technical Review. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 182496. doi:10.1155/2014/182496
- Goodfellow, H. D., & Curd, E. F. (2020). Chapter 4 - Physical fundamentals. In H. D. Goodfellow & R. Kosonen (Eds.), *Industrial Ventilation Design Guidebook (Second Edition)* (pp. 39-109): Academic Press.
- Goswami, A., & Han, B. (2008). On the applicability of MIL-Spec-based helium fine leak test to packages with sub-micro liter cavity volumes. *Microelectronics Reliability*, 48(11-12), 1815-1821. doi:10.1016/j.microrel.2008.07.067
- Greenhouse, H., Lowry, R. K., & Romenesko, B. (2011). *Hermeticity of Electronic Packages*: William Andrew.
- Hallinan, A. J. (1993). A Review of the Weibull Distribution. *Journal of Quality Technology*, 25(2), 85-93. doi:10.1080/00224065.1993.11979431
- Han, B. (2012). Measurements of true leak rates of MEMS packages. *Sensors (Basel)*, 12(3), 3082-3104. doi:10.3390/s120303082
- Haščič, I. a. d. V., Frans P. and Johnstone, Nick and Medhi, Neelakshi. (2009). Effects of Environmental Policy on the Type of Innovation: The Case of Automotive Emissions Control Technologies. *OECD Journal: Economic Studies*, 2009(1), 49-66. doi:<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1523781>
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd edition. ed.). New York: McGraw-Hill Education.

- Hilbert, J. L. (1991). Chapter 1 - Introduction to ASIC Technology. In N. G. Einspruch & J. L. Hilbert (Eds.), *Application Specific Integrated Circuit (ASIC) Technology* (pp. 1-6): Academic Press.
- Hooftman, N., Messagie, M., Van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2018). A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86, 1-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.012>
- Houskeeper, W. G. (1923). The art of sealing base metals through glass. *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, 42(9), 954-960. doi:10.1109/JoAIEE.1923.6593372
- How Diesel Engines Work - Part - 2 (Stages of Combustion) - YouTube. (2018).
- Howl, D. A., & Mann, C. A. (1965). The back-pressurising technique of leak-testing. *Vacuum*, 15(7), 347-352. doi:[https://doi.org/10.1016/0042-207X\(65\)91083-3](https://doi.org/10.1016/0042-207X(65)91083-3)
- Hoyle, D. (2005). Setting the Standard. *Manufacturing Engineer*, 84(6), 44 - 47.
- Hui He, L. J. (2017). A historical review of the U.S. vehicle emission compliance program and emission recall cases. *The International Council on Clean Transportation White Papers*, 2017.04.12, 73.
- Hung, Y. Y., & Ho, H. P. (2005). Shearography: An optical measurement technique and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49(3), 61-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001>
- Industry, A. f. T. (2019). ATIS Telecom Glossary. <https://glossary.atis.org/>: ATIS.
- Itoh, Y., Kobayashi, M., Okamoto, T., Imaya, A., Sakai, Y., & Yoshinaga, S. (2021). Influence of chronic and excessive nitrogen influx on forest ecosystems connected to the Tokyo metropolitan area. *Ecological Indicators*, 127, 107771. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107771>
- Jakati, R. S., Balavalad, K. B., & Sheeparamatti, B. G. (2017, 19-20 May 2017). *Sensitivity enhancement in piezoresistive micro-pressure sensor using perforated diaphragm*. Paper presented at the 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT).
- John, P. C., Abhay, J., Pramod, S., Ajayakumar, P. D., & Natarajan, K. (2010, July 29 2010-Aug. 1 2010). *Signal conditioner for MEMS based piezoresistive sensor*.

- Paper presented at the 2010 5th International Conference on Industrial and Information Systems.
- Kaajakari, V. (2018). Silicon as an anisotropic mechanical material (Vol. I, pp. 496): Small-Gear-Publishing.
- Kennedy, H. H. (1999). Consent Decree between the United States and Caterpillar. *Civil Action 98-02544*.
- Kimchi, M., & Phillips, D. H. (2017). Resistance Spot Welding: Fundamentals and Applications for the Automotive Industry. *Synthesis Lectures on Mechanical Engineering*, 1(2), i-115. doi:10.2200/S00792ED1V01Y201707MEC005
- Knecht, W. (2008). Diesel engine development in view of reduced emission standards. *Energy*, 33(2), 264-271. doi:10.1016/j.energy.2007.10.003
- Kocher, L., Koeberlein, E., Stricker, K., Alstine, D. G. V., Biller, B., & Shaver, G. M. (2011, June 29 2011-July 1 2011). *Control-oriented modeling of diesel engine gas exchange*. Paper presented at the Proceedings of the 2011 American Control Conference.
- Kodjak, D., Sharpe, B., & Delgado, O. (2015). Evolution of heavy-duty vehicle fuel efficiency policies in major markets. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. doi:10.1007/s11027-015-9632-5
- Kökkülünk, G., Gonca, G., & Parlak, A. (2014). The Effects of Design Parameters on Performance and NO Emissions of Steam-Injected Diesel Engine with Exhaust Gas Recirculation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(5), 4119-4129. doi:10.1007/s13369-014-0984-z
- Krishnamurthy, M., Carder, D. K., Thompson, G., & Gautam, M. (2007). Cost of lower NOx emissions: Increased CO2 emissions from heavy-duty diesel engines. *Atmospheric Environment*, 41(3), 666-675. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.05.059
- Lahdenperä, K. (2015). Sizing of fatigue cracks using different eddy current techniques and simulation. *VTT Technical Research Centre of Finland*.
- Lee, J. H., & Foster, N. R. (1990). Mass transfer and solubility of oxygen and methane in silicone fluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 29(4), 691-696. doi:10.1021/ie00100a031
- Ling, S.-F., Wan, L.-X., Wong, Y.-R., & Li, D.-N. (2010). Input electrical impedance as quality monitoring signature for characterizing resistance spot welding. *NDT*

- & *E International*, 43(3), 200-205.  
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.11.003>
- Manladan, S. M., Yusof, F., Ramesh, S., Zhang, Y., Luo, Z., & Ling, Z. (2017). Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded in welding-brazing mode and resistance element welded magnesium alloy/austenitic stainless steel joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 45-54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.006>
- Mann, N., Kvinge, F., and Wilson, G. (1998). Diesel Fuel Effects on Emissions: Towards a Better Understanding,. *International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition*(SAE Technical Paper 982486), 16.  
 doi:<https://doi.org/10.4271/982486>
- McClellan, R. O., Hesterberg, T. W., & Wall, J. C. (2012). Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology. *Regul Toxicol Pharmacol*, 63(2), 225-258.  
 doi:10.1016/j.yrtph.2012.04.005
- McWhorter, P., Miller, S., Miller, W., & Rost, T. (2001). MEMS Performance & Reliability: IEEE.
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448-511.  
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Mohr, S., & Ward, J. (2014). Helium Production and Possible Projection. *Minerals*, 4(1), 130-144.
- Mollenhauer, K., & Tschöke, H. (2010). *Handbook of Diesel Engines* (pp. XIII, 636).  
 doi:10.1007/978-3-540-89083-6
- Nesbit, M., Fergusson, M., & Colsa, A. (2016). *Comparative Study on the Differences between the EU and US Legislation on Emissions in the Automotive Sector*. (QA-05-16-022-EN-N). EU publications.
- Ntziachristos, L., Papadimitriou, G., Ligterink, N., & Hausberger, S. (2016). Implications of diesel emissions control failures to emission factors and road transport NOx evolution. *Atmospheric Environment*, 141, 542-551.  
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.036>

- Paerl, H. W., & Scott, J. T. (2010). Throwing Fuel on the Fire: Synergistic Effects of Excessive Nitrogen Inputs and Global Warming on Harmful Algal Blooms. *Environmental Science & Technology*, 44(20), 7756-7758. doi:10.1021/es102665e
- Park, H., Choi, M., Park, J., & Kim, W. (2014). A study on detection of micro-cracks in the dissimilar metal weld through ultrasound infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 62, 124-131. doi:10.1016/j.infrared.2013.10.006
- Park, T.-Y., Kim, S.-H., Kim, H., & Oh, H.-U. (2018). Experimental Investigation on the Feasibility of Using Spring-Loaded Pogo Pin as a Holding and Release Mechanism for CubeSat's Deployable Solar Panels. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 4854656. doi:10.1155/2018/4854656
- Pask, J. A. (1948). New Techniques in Glass-to-Metal Sealing. *Proceedings of the IRE*, 36(2), 286-289. doi:10.1109/JRPROC.1948.233914
- Perduta, A., & Putanowicz, R. (2015). Comparison of Elastomer Modelling in Various FEM Packages. *Procedia Engineering*, 108, 510-517. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.113>
- Potting Gel SIFEL8000 series. (2018). *Shin-Etsu Adhesive Standard*, 1(1), 2.
- A Practical Guide to TM 1014 (Seal) - TJ Green Associates LLC. (2016).
- Qian, S. S., Refsnider, J. M., Moore, J. A., Kramer, G. R., & Streby, H. M. (2020). All tests are imperfect: Accounting for false positives and false negatives using Bayesian statistics. *Heliyon*, 6(3), e03571. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03571>
- Rajavelu, M., Sivakumar, D., Rathnam, J. D., & Sumangala, K. (2013). Enhanced sensitivity with extended linearity in MEMS piezoresistive pressure sensor. *IET Micro & Nano Letters*, 8(10), 753-756. doi:10.1049/mnl.2013.0496
- Reşitoğlu, İ. A., Altinişik, K., & Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1), 15-27. doi:10.1007/s10098-014-0793-9
- Safi, A. M., Akanda, M. A. S., Sadique, J., & Alam, M. S. (2014). Nondestructive Evaluation of Spot Weld in Stainless Steel Using Ultrasonic Immersion Method. *Procedia Engineering*, 90, 110-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.822>

- Sarvi, A., & Zevenhoven, R. (2010). Large-scale diesel engine emission control parameters☆. *Energy*, 35(2), 1139-1145. doi:10.1016/j.energy.2009.06.007
- SCHOTT glass-to-metal sealing (GTMS) technology | SCHOTT North America. (2018).
- Schubert, F., Hipp, R., & Gommlich, A. (2014). *Determination of Diameter and Thickness of Weld Nuggets in Resistance Spot Weldings by High Frequency Ultrasound Inspection*.
- Shaby, S. M., & Juliet, A. V. (2011, 22-24 Sept. 2011). *Performance analysis and validation of sensitivity of piezoresistive MEMS pressure sensor*. Paper presented at the 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems.
- Smith, C. S. (1954). Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. *Physical Review*, 94(1), 42-49. doi:10.1103/PhysRev.94.42
- Smith, J. (2016). How and Why Camshaft Manufacturers Grind Advance Into Camshafts.
- Song, E. Y., & Lee, K. (2008). Understanding IEEE 1451-Networked smart transducer interface standard - What is a smart transducer? *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 11(2), 11-17. doi:10.1109/MIM.2008.4483728
- Ștefănescu, D. M. (2011, 22-25 March 2011). *Strain gauges and Wheatstone bridges — Basic instrumentation and new applications for electrical measurement of non-electrical quantities*. Paper presented at the Eighth International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices.
- Suárez-Bertoa, R., Mendoza-Villafuerte, P., Bonnel, P., Lilova, V., Hill, L., Perujo, A., & Astorga, C. (2016). On-road measurement of NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a Euro V heavy-duty vehicle. *Atmospheric Environment*, 139, 167-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.035>
- Summerville C., A. D., Compston P., Doolan, M. (2017). Process Monitoring of Resistance Spot Welding Using the Dynamic Resistance Signature. *Welding Journal*, 96, 403-412.
- Tanner, D. M. (2009). MEMS reliability: Where are we now? *Microelectronics Reliability*, 49(9-11), 937-940. doi:10.1016/j.microrel.2009.06.014

- Tao, Y., & Malshe, A. P. (2005). Theoretical investigation on hermeticity testing of MEMS packages based on MIL-STD-883E. *Microelectronics Reliability*, 45(3-4), 559-566. doi:10.1016/j.microrel.2004.08.004
- Testing, T. I. C. f. N.-D. (2012). ICNDT Guide to Qualification and Certification of Personnel for NDT. <http://www.icndt.org/>: The British Institute of Non-Destructive Testing.
- Townsend, A., Senin, N., Blunt, L., Leach, R. K., & Taylor, J. S. (2016). Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precision Engineering*, 46, 34-47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001>
- Twigg, M. V. (2007). Progress and future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 70(1), 2-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.02.029>
- van Driel, W. D., Yang, D. G., Yuan, C. A., van Kleef, M., & Zhang, G. Q. (2007). Mechanical reliability challenges for MEMS packages: Capping. *Microelectronics Reliability*, 47(9-11), 1823-1826. doi:10.1016/j.microrel.2007.07.033
- Vander Voort, G. F. (1999). *Metallography, Principles and Practice*: ASM International.
- Wan, X., Wang, Y., Zhao, D., & Huang, Y. (2017). A comparison of two types of neural network for weld quality prediction in small scale resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 93, 634-644. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.028>
- Wan, X., Wang, Y., Zhao, D., Huang, Y., & Yin, Z. (2017). Weld quality monitoring research in small scale resistance spot welding by dynamic resistance and neural network. *Measurement*, 99, 120-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.010>
- Wise, K. D. (1991, 30 Jan-2 Feb 1991). *Integrated microelectromechanical systems: A perspective on MEMS in the 90s*. Paper presented at the Micro Electro Mechanical Systems, 1991, MEMS '91, Proceedings. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots. IEEE.

- Witvrouw, A., Tilmans, H. A. C., & De Wolf, I. (2004). Materials issues in the processing, the operation and the reliability of MEMS. *Microelectronic Engineering*, 76(1-4), 245-257. doi:10.1016/j.mee.2004.07.001
- Yamada, K., Nishihara, M., Shimada, S., Tanabe, M., & Shimazoe, M. (1983). Temperature dependence of the piezoresistance effects of p-type silicon diffused layers. *Electrical Engineering in Japan*, 103(5), 8-16. doi:10.1002/eej.4391030503
- Yang, Z., Winward, E., O'Brien, G., Stobart, R., & Zhao, D. (2016). Modelling the Exhaust Gas Recirculation Mass Flow Rate in Modern Diesel Engines. *SAE Technical Paper 2016-01-0550*. doi:10.4271/2016-01-0550
- Yangfan, W., Xizhang, C., & Chuanchu, S. (2019). Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 374, 116-123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.079>
- Zhan, R., Eakle, S., Miller, J., and Anthony, J. (2009). EGR System Fouling Control. *SAE International Journal of Engines*, 117-3EJ (Diesel Exhaust Emission Control), 6. doi:<https://doi.org/10.4271/2008-01-0066>
- Zhou, K., Shi, T., & Cai, L. (2017). Online measuring the electrical resistivity of molten nugget of stainless steel in resistance spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 109-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.026>
- Zongyang, Z., Chaojun, L., Zhimin, W., Gang, C., Yun, L., Bin, S., & Sheng, L. (2010, 16-19 Aug. 2010). *Optimization of packaging process of piezoresistive engine oil pressure sensor*. Paper presented at the Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP), 2010 11th International Conference on.