

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

*Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero  
Mecánico Automotriz*

**ARTÍCULO ACADÉMICO:**

**“ANÁLISIS DE MODOS DE FALLO AMFEC DE UN MOTOR AVEO 1.4L, MEDIANTE  
FRAGMENTACIÓN DE MICROCICLOS EN FUNCIÓN DE LAS SEÑALES PID’S”**

**AUTORES:**

GABRIEL FERNANDO PACHO SINCHI  
EDISSON ESTUARDO TACURI GARZÓN

**TUTOR:**

ING. NÉSTOR DIEGO RIVERA CAMPOVERDE, MSc.

CUENCA - ECUADOR

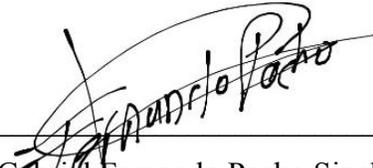
2020

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Gabriel Fernando Pacho Sinchi con documento de identificación N° 0107199754 y Edison Estuardo Tacuri Garzón con documento de identificación N° 0105841639, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE MODOS DE FALLO AMFEC DE UN MOTOR AVEO 1.4L, MEDIANTE FRAGMENTACIÓN DE MICROCICLOS EN FUNCIÓN DE LAS SEÑALES PID’S”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico Automotriz*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

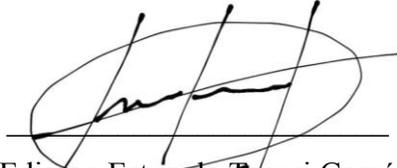
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre del 2020



---

Gabriel Fernando Pacho Sinchi  
C.I. 0107199754



---

Edison Estuardo Tacuri Garzón  
C.I. 0105841639

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE MODOS DE FALLO AMFEC DE UN MOTOR AVEO 1.4L, MEDIANTE FRAGMENTACIÓN DE MICROCICLOS EN FUNCIÓN DE LAS SEÑALES PID’S”**, realizado por Gabriel Fernando Pacho Sinchi y Edison Estuardo Tacuri Garzón, obteniendo el *Artículo Académico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2020



Ing. Néstor Diego Rivera Campoverde, MSc.

C.I. 0103898995

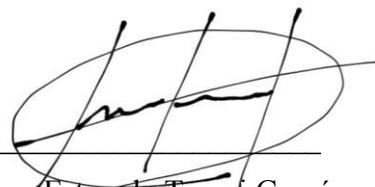
## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Gabriel Fernando Pacho Sinchi con documento de identificación N° 0107199754 y Edison Estuardo Tacuri Garzón con documento de identificación N° 0105841639, autores del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE MODOS DE FALLO AMFEC DE UN MOTOR AVEO 1.4L, MEDIANTE FRAGMENTACIÓN DE MICROCICLOS EN FUNCIÓN DE LAS SEÑALES PID’S”**, certificamos que el total contenido del *Artículo Académico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre del 2020



\_\_\_\_\_  
Gabriel Fernando Pacho Sinchi  
C.I. 0107199754



\_\_\_\_\_  
Edison Estuardo Tacuri Garzón  
C.I. 0105841639

## **DEDICATORIA**

El presente Artículo Académico, está dedicado con infinito amor y gratitud, a mis padres Liria Bertila Garzón Rodas y Manuel Efraín Tacuri Quezada, quienes siempre han estado a lo largo de mi vida apoyándome en cada uno de los proyectos emprendidos y siendo un pilar fundamental para la culminación de mi carrera universitaria. De la misma forma a mi esposa Diana Alejandra Aguirre Ochoa y a mi hija Rafaela Tacuri, quienes me apoyaron en los momentos más difíciles de mi carrera y quienes me dieron ánimos para seguir adelante. También dedico este artículo a los miembros de mi familia quienes me han orientado y ayudado de una u otra manera en este tiempo para ver cristalizada esta meta personal, finalmente dedico este logro a mi tío Fernando Garzón a quién considero mi segundo padre y quién creyó en mí incondicionalmente para iniciar mi carrera universitaria.

## **DEDICATORIA**

El presente Artículo Académico, está dedicado, a mis padres Ángel María Pacho Pillco y María Rosario Sinchi Roldán, quienes confiaron en mi al comenzar esta etapa que está a punto de culminar con éxito, de la misma forma quiero agradecer a mi Abuelos y cada uno de los miembros de mi familia, que de una u otra manera me ayudaron en este tiempo y fueron parte fundamental de la cristalización de esta meta.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de vivir esta grata experiencia en el mundo del aprendizaje, por haberme regalado la opción de capacitarme y de tomar de manera acertada las herramientas brindadas por los docentes de la universidad, quienes han formado parte importante de mi trayectoria profesional y que a lo largo de este tiempo me ha servido para ponerlo en práctica en el mundo laboral. Agradezco de manera especial a los docentes de la universidad que se han tomado largas horas de tiempo para compartimos el conocimiento aprendido a lo largo de su vida y que es el tesoro más valioso que puede ser compartido en el mundo.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la oportunidad de vivir y de esta forma me ha regalado la oportunidad de realizar el cumplimiento de esta meta y de los anhelos que me he propuesto, quiero agradecer a mi madre de una manera especial quien ha demostrado ser un pilar fundamental en mi vida y quien me ha enseñado las responsabilidades con las que cuento como ser humano.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
II.	METODOLOGÍA .....	2
1	Enfoque del desarrollo para el análisis de modos de fallos, efecto y criticidad (AMFEC).....	2
1.1	Identificación del modo de falla, efecto y criticidad en el vehículo .....	9
1.2	Efectos y consecuencias de las fallas.....	9
1.3	Determinación de la probabilidad de ocurrencia.....	11
1.4	Determinación de la gravedad del fallo.....	11
1.5	Determinación de la probabilidad de no detección.....	11
1.6	Determinación del índice de prioridad de riesgo (IPR).....	11
1.7	Ponderación de datos de los fallos ocasionados.....	11
2	Adquisición de datos.....	4
3	Proceso comparativo en estado estacionario entre motor en buen estado vs motor con fallos provocados.....	4
4	Resultados y discusión.....	4
4.1	Análisis de fallos.....	4
4.2	Análisis de fallos mediante ANOVA.....	7
	CONCLUSIONES.....	11
	Referencias .....	12

# Análisis de modo de fallo AMFEC de un motor Aveo 1.4L, mediante fragmentación de microciclos en función de las señales Pid's

G. F. Pacho and E.E. Tacuri

**Resumen**— *El presente artículo describe el análisis de modos de fallos AMFEC de un motor Aveo 1.4L en función de las señales Pid's en estado estacionario y transitorio en dos etapas: la primera con el motor en buen funcionamiento y la segunda con fallos provocados en el mismo. Estos fallos son: desconexión de una bujía, anulación de un inyector y saturación del filtro de aire. La adquisición de datos se realizó mediante la implementación del dispositivo freematics one +. Con la adquisición de datos se generó una matriz de resultados mediante fragmentación de microciclos. Del análisis de la matriz de resultados se identifica el cambio que existe en un motor con fallos provocados y un motor en perfecto estado a través de histogramas. De la misma forma se aplica un ANOVA para corroborar el cambio de los estados del motor. Otro punto importante planteado en la investigación es la aplicación del análisis AMFEC para corroborar cual es el fallo más crítico y los efectos que causan en el funcionamiento del motor. Como resultado principal se define que en la toma de decisiones basando en un modelo amfec se puede optimizar en la tarea de mantenimiento de un vehículo Aveo 1.4l.*

**Palabras clave**— Freematics, adquisición de datos, ANOVA, AMFEC, fallos, histogramas.

## I. INTRODUCCIÓN

AL gran potencial que se le atribuye al diagnóstico remoto de vehículos, existen pocas aplicaciones prácticas que aborden las necesidades de los usuarios finales. El documento que hace referencia a un prototipo para diagnóstico remoto del vehículo concluye con una perspectiva a futuro sobre cómo la ingeniería puede soportar nuevos tipos de servicios basados en las necesidades de los usuarios frente al diagnóstico de su vehículo en forma más personalizada, en un tiempo más temprano y de manera acertada [1].

Hoy en día, la cantidad de datos generados y su uso tiene el potencial de mejorar la calidad del producto en análisis, pues existe innumerables sistemas que pueden ser mejorados desde el área industrial estando en esta área el sector automotriz, estos están creciendo rápidamente con un punto de vista centrado en el aprendizaje automático [2].

Se puede obtener información del vehículo en funcionamiento a través gran variedad de sensores, los mismos que son cada vez más precisos, pequeños y provistos de conectividad integrada, que pueden monitorear diferentes elementos y estados del automóvil tales como el estilo de conducción, condiciones ambientales, etc., generando datos de gran magnitud sobre el vehículo, que pueden analizarse para revelar patrones y tendencias, en referencia a los llamados grandes datos (big Data) [3, 4].

Con el fin de lograr una operación del motor óptima y continua, los métodos de calibración del motor utilizan una combinación de correlaciones estáticas obtenidas de las pruebas del banco dinamómetro de rodillos para puntos de operación en estado estacionario, con el fin de reducir el número de pruebas requeridas para calibrar motores modernos [5].

Con la misma intención de optimizar la operación del motor mediante aprendizaje automático para el ahorro de combustible, se utilizan los algoritmos de aprendizaje para que los parámetros de operación se pueden ajustar de manera óptima al proceso de inyección. Es así que se puede lograr el consumo óptimo de combustible y CO<sub>2</sub>. Como resultado se muestra que, en condiciones reales de conducción, en promedio, el 14% de CO<sub>2</sub> se puede ahorrar utilizando una estrategia operativa de aprendizaje controlado [6].

Utilizando un sistema de medición de emisiones portátil, se probaron 16 automóviles de pasajeros de gasolina en una ruta fija que consta de diferentes tipos de carreteras en Macao. Los niveles normalizados de emisiones de HC, CO y NO<sub>x</sub> de las siete muestras de automóviles de pasajeros con modelos del año anterior al 2000 fueron  $3.19 \pm 5.04$ ,  $14.59 \pm 22.88$ ,  $2.57 \pm 2.12$  g / km, respectivamente. El consumo de combustible se adapta mejor a la velocidad media con una función de potencia. En comparación con las condiciones de conducción promedio, los factores de emisión de HC, CO y NO<sub>x</sub> y el consumo de combustible de los automóviles de pasajeros de gasolina durante las horas pico en la península de Macao se incrementará en un 61, 55, 45 y 90%, respectivamente. Es por eso que teniendo en cuenta el comportamiento del vehículo tanto en velocidad media, aceleración y desaceleración se logra tener

G. F. Pacho, está en la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, correo: gpacho@est.ups.edu.ec

E. E. Tacuri, está en la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, correo: etacurig@est.ups.edu.ec

una atmosfera mucho más grande y viable para el aprendizaje lógico en donde luego del análisis de datos reales se establece límites en los sistemas del vehículo que determinan un buen y un mal funcionamiento.

[7].

El documento de aprendizaje neuronal incremental (INL) y su aplicación al diagnóstico de vehículos permite que un sistema de aprendizaje neuronal base, aprenda de manera incremental nuevos conocimientos a partir de datos nuevos sin olvidar los conocimientos existentes. Se ha aplicado INL a dos problemas de diagnóstico de fallas del vehículo en plantas de ensamblaje automático y detección de fallas a bordo del vehículo donde los resultados experimentales demuestran que el marco INL tiene la capacidad de realizar con éxito un aprendizaje incremental a partir de datos no balanceados y ruidosos. Los sistemas INL mostraron buenas capacidades de generalización en comparación con otros algoritmos de aprendizaje automático [8].

También, la Clasificación de habilidades de conducción en escenas de conducción se demuestra la viabilidad de utilizar el aprendizaje automático para evaluar la habilidad de manejo a partir de los resultados de un simulador de manejo. Experimentamos con escenas de conducción de curvas, utilizando escenarios de curva completa y curva segmentada. En la escena de conducción de curva completa, el análisis de componentes principales y un método de vector de soporte basado en máquina clasificaron con precisión los conductores en el 95.7% de los casos al usar datos de conducción sobre grupos de conductores con habilidades altas y bajas / promedio [9].

Al identificar una metodología práctica para analizar un ciclo de manejo representativo que refleje las condiciones de manejo del mundo real para la prueba y estimación de emisiones de vehículos, la legislación vigente establece límites de emisiones cada vez más estrictos. Por lo que los vehículos deben realizar pruebas de homologación que certifiquen que las nuevas tecnologías que entrarán al mercado. Lo cual presenta una disminución en el consumo de combustible y una disminución en la emisión de contaminantes. [10-11].

El estudio de la investigación del desarrollo de un algoritmo mediante análisis de aprendizaje automático permite observar la ausencia de una metodología para el análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) en el sistema de inyección del motor de combustión interna de un vehículo, a partir de los datos obtenidos mediante el dispositivo freematics sobre su comportamiento en situaciones diferentes de funcionamiento tales como: estacionario y transitorio, mediante la obtención de histogramas para que de esta manera se pueda modificar los planes de mantenimiento que se dan e implementar nuevos planes y técnicas con el fin de disminuir al mínimo la falla del sistema.[12].

En este trabajo se presenta un enfoque de aprendizaje automático basado en simulación a gran escala donde los resultados muestran que un modelo sustituto basado en una red neuronal profunda que logra una alta precisión: valores de correlación momento-producto de Pearson mayores que 0,99 y error porcentual absoluto medio dentro del 1,07% para varios

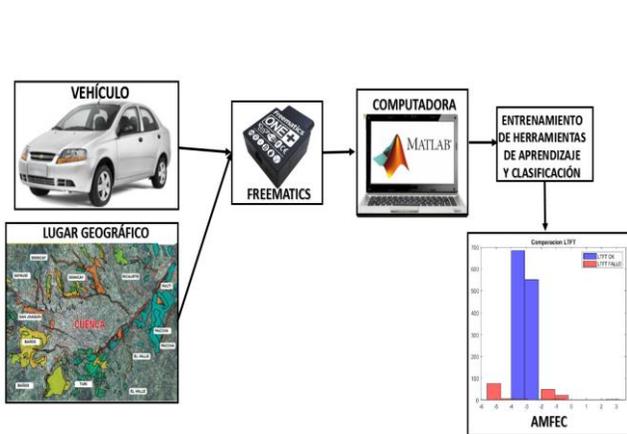
parámetros del motor. Para evaluar los datos se debe aplicar las técnicas estadísticas multivariada (análisis discriminante) y univariada (análisis de la varianza), para discriminar diferentes sistemas de manejo en dos marginaciones. Los resultados deben indicar cual mecanismo es más eficiente para discriminar los diferentes sistemas de manejo y para identificar las alteraciones inducidas por esos sistemas. [13].

Para el análisis estadístico se utiliza el modo Tukey para la creación de intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores mientras controla la tasa de error por familia en un nivel especificado, este método ajusta el nivel de confianza de cada intervalo individual para que el nivel de confianza sea simultáneo. [14]. La ECU del vehículo tiene que estar ajustando todo el tiempo el ancho de pulso de los inyectores debido a un problema provocado, en el cual el vehículo no es eficiente en desempeño y en emisiones contaminantes, por lo que el fabricante ha diseñado un ajuste de combustible para el ancho de pulso de los inyectores, como una manera de irse adaptando a estos problemas. A esto se lo denomina ajuste de combustible a largo plazo que corrige la deficiencia del vehículo. [15].

## II. METODOLOGÍA

### 1. Enfoque del desarrollo para el análisis de modos de fallos, efecto y criticidad (AMFEC).

En este documento, para el análisis de modos de fallos se tomó en cuenta el factor del vehículo con mayor venta en el país, para lo cual el antecedente se basa en la estadística del Anuario de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, donde el vehículo AVEO EMOTION 1.4 L 4P GLS es el más vendido [16]. Los datos de conducción se basaron en las señales PID's que se obtienen de varios sensores del vehículo con respecto al lugar geográfico, que en este caso fue la ciudad de Cuenca se encuentra a 2.538 m.s.n.m y presenta un clima con temperaturas que oscilan entre los 14°C y los 18°C, durante todo el año. [17]. La ruta se seleccionó debido a que consta de dos escenarios: a) Frente a la etapa que simula a la conducción interna en la ciudad y la hora seleccionada de 18:00 a 20:00 la hace la hora más propicia para la generación de tráfico en este tramo en donde se obtiene aceleración y desaceleración, b) En la segunda parte de la ruta se tiene una velocidad media debido a que se toma el tramo de la autopista cuenca azogues ( E35) sumándole a esto existe etapas de conducción en pista plana, pendientes crecientes y decrecientes que nos entregan muchos más datos para el análisis y diferenciación ante el comportamiento del motor. Mediante el uso del dispositivo Freematics one+. Seguidamente los datos son procesados mediante el uso del software Matlab y mediante el algoritmo ("K' means") de aprendizaje sin supervisión y el uso de la herramienta de aprendizaje para la predicción de falla. El diagrama de flujo del enfoque propuesto de este estudio para el análisis de modos de fallos, efecto y criticidad (AMFEC) se muestra en la Figura 1. Los pasos del procedimiento se describen en las siguientes secciones.

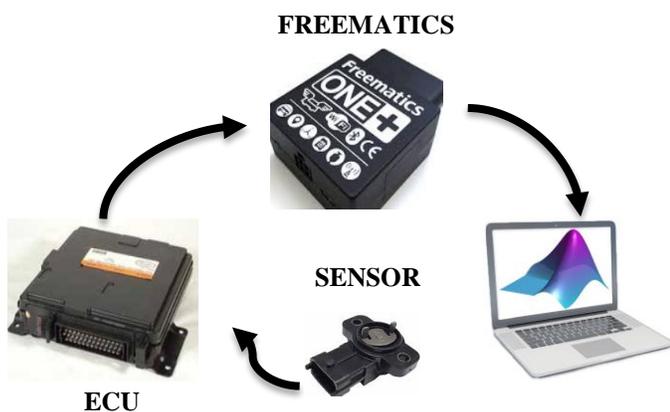


**Figura 1** Diagrama de flujo del enfoque del desarrollo para la detección de eventos de los ciclos de conducción.

## 2. Adquisición de datos.

La recolección de datos de conducción se obtuvo en condiciones estacionarias y transitorias.

El estado transitorio se lo realizó dentro de la ciudad de Cuenca en condiciones de un estilo de conducción normal, donde se empleó el uso del dispositivo freematics para la recolección de datos de conducción por ser un dispositivo discreto para el conductor, en la Figura 2 se puede apreciar el sistema de adquisición de datos.



**Figura 2** Sistema de adquisición de datos.

Por otra parte, para la adquisición de datos se realiza un proceso en el cual se conecta el dispositivo freematics en el socket de 16 pines (OBD2) del vehículo Chevrolet Aveo, para obtener los datos en un funcionamiento correcto para posteriormente generar las fallas en el motor, todo esto en estado estacionario y transitorio con el motor que alcanza una temperatura adecuada de funcionamiento, donde se realiza recorridos de aproximadamente 15 min en estado transitorio. En la Figura 3 se muestra el proceso para la adquisición de datos.



**Figura 3** Proceso para la adquisición de datos.

## 3. Proceso comparativo en estado estacionario entre motor en buen estado vs motor con fallos provocados.

De acuerdo a [18], las fallas incipientes más comunes para el motor de combustión interna son las bujías, filtro aire y falla de la inyección, por este motivo se tomó como referencia para el análisis de modos de fallos AMFEC.

Para el proceso comparativo de un motor en buen estado y en fallo supervisado es necesario la utilización del programa Matlab siguiendo un diagrama de flujo que se presenta a continuación en la Figura 4, logrando finalmente la obtención de histogramas que se analizan a continuación.

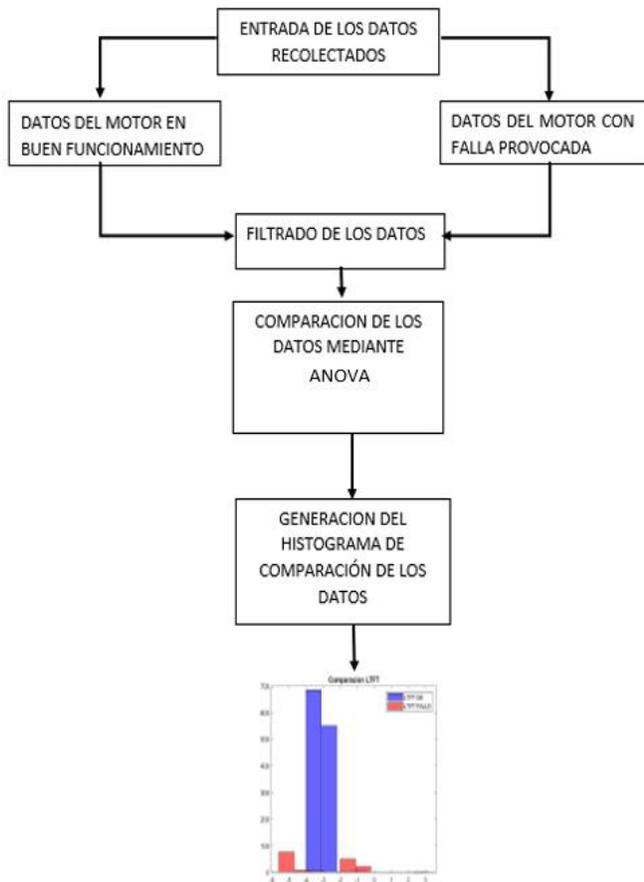


Figura 4 Proceso para la comparación de datos.

#### 4. Resultados y discusión

A continuación, se realiza de forma detallada un análisis comparativo entre un motor en buen estado (motor ok) vs motor con fallos provocados tales como: fallo de bujía, fallo de inyector, fallo de saturación de filtro de aire, El sensor O2 cumple una función básica de informar a la ECU la cantidad de oxígeno en los gases que expulsa el motor en funcionamiento. [19].

##### 4.1. Análisis de fallos

Para el análisis de fallo de este estudio se tomó en cuenta la información contenida en el siguiente artículo [20], específicamente en el capítulo 2.4.1, donde se indica que para obtener un principio básico de detección de fallas se necesita una señal de entrada y una consecuencia de salida además de la respectiva verificación en cada instante de tiempo (t), a esto se suma la consistencia del sistema con el modelo, cumpliéndose de manera más efectiva la comparación de datos con el sensor de oxígeno. Para lograr este objetivo se obtuvo una generación de residuos que realizaron una redundancia analítica basada en conocimientos de modelos cualitativos y basado en datos de modelos de redes neuronales. Otra de las características que se tomó en cuenta para la comparación del PID del sensor de oxígeno entre motor ok y los diferentes fallos provocados, se dio ya que las comparaciones realizadas en PID'S de ajuste de

combustible a largo y corto plazo no muestran una variación notoria de cambio con el que se pueda tener conclusiones más acertadas.

En el histograma de la figura 5 se indica la diferencia de la señal del sensor de oxígeno entre la falla de bujía y el motor ok. Los rectángulos de igual ancho, pero de altura variable, indican una distribución binomial heterogénea debido a la frecuencia de voltaje obtenida en la corrección del tiempo de inyección, debido a la presencia de hidrocarburos no combustionados que pasan por el escape y sensor de oxígeno provocando que el mismo se genere el estado de mezcla rica.

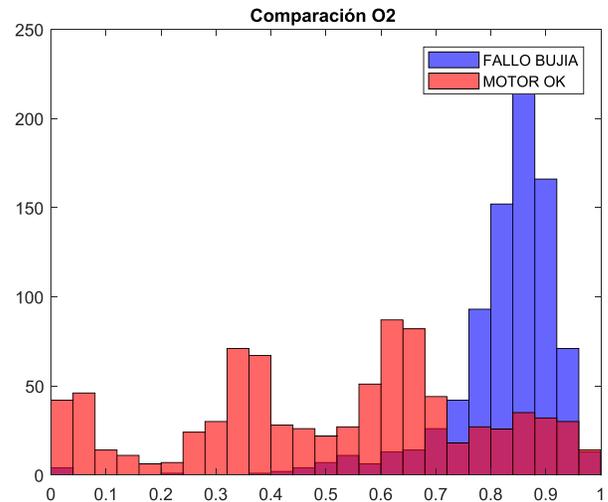


Figura 5 Histograma de fallo de bujía.

En la tabla 1 se observan los valores característicos (media, desviación standard y varianza) para la condición de motor ok y fallo de bujía, evidenciándose una variación que denota el aumento de un 9% de la falla con respecto al motor ok. Al no existir el funcionamiento de un cilindro el motor adopta un comportamiento de compensación controlado por la ECU, que consiste en enviar a los cilindros más combustible para compensar el fallo, por ende, se provoca un aumento en la contaminación, consumo de combustible y posibles daños en componentes del motor.

Tabla 1 Cálculo de la media, estándar y varianza de la falla de bujía

	Media	Desviación Standard	Varianza
Fallo de bujía	0.4858	0.2734	0.07475
Motor ok	0.445	0.1298	0.0168

En el histograma de la figura 6 se indica la diferencia de la señal del sensor de oxígeno entre la falla de inyector y el motor ok. Los rectángulos de igual ancho, pero de altura variable indican una distribución binomial heterogénea debido a la frecuencia del voltaje obtenido por la corrección del tiempo de inyección de la ECU.

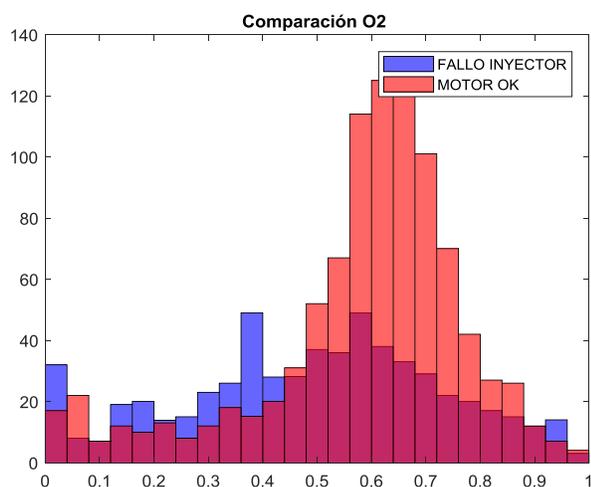


Figura 6 Histograma de fallo de inyector.

En la tabla 2 se observa valores característicos de la media donde el motor ok es de 0.48v y el valor de media cuando el motor está con falla de inyector es de 0.43v, el cálculo de varianza entrega un valor de 0.01v con el motor ok y el valor de 0.08v con falla de inyector, este hecho da lugar a que existe una variación entre los dos elementos comparados que denota un aumento de una variación del 10% entre las dos comparaciones es decir al igual que en la tabla 1 al existir una descompensación en el motor debido al no funcionamiento de uno de los cilindros debido a una falla provocada de inyección, la ECU compensa inmediatamente el fallo generando un pulso de inyector más prolongado realizando la acción de mayor entrada de combustible, al no recibir una diferencia en el comportamiento deja entrar más combustible a los demás cilindros tratando de nivelar el desequilibrio del motor, de esta manera se genera mayor contaminación debido al consumo de combustible además de daño en los componentes del motor como bujía, sensor de oxígeno entre otros.

Tabla 2 Cálculo de la media, estándar y varianza de la falla de inyector.

	Media	Desviación Standard	Varianza
Fallo de inyector	0.4309	0.2924	0.0855
Motor ok	0.4803	0.1379	0.0190

La mayor frecuencia de valores de voltaje se aprecia en el histograma de la figura 7 en el cual se presenta la falla de filtro de aire y el motor ok mediante una diferencia de la frecuencia realizada en la distribución de los datos del sensor de oxígeno, además en el histograma se puede observar las alturas de los rectángulos en el que existe una diferencia en la frecuencia de voltaje debido a la corrección del pulso de inyección por parte de la ECU.

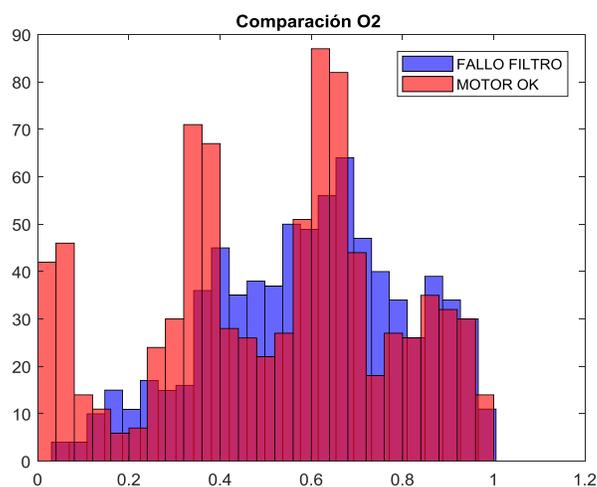


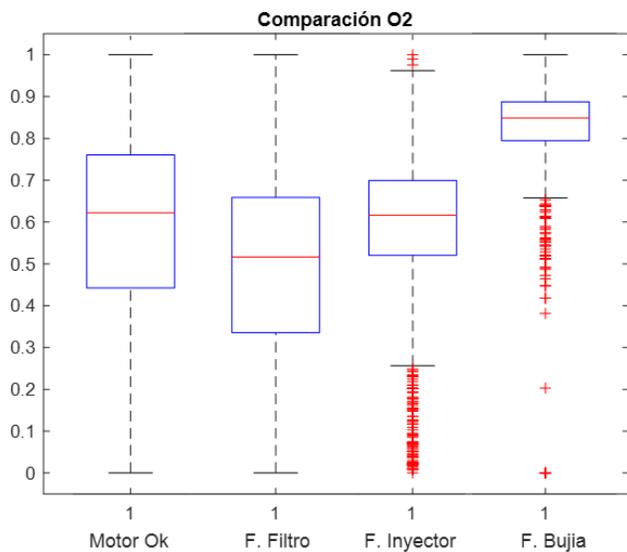
Figura 7 Histograma de fallo de filtro de aire.

En la tabla 3 se observa valores característicos de la media, misma que en el motor ok es de 0.48v y el valor de media cuando el motor está con fallo de saturación del filtro de aire es de 0.15v, el cálculo de variación entrega un valor de 0.07v con el motor ok y el valor de 0.04v con falla de filtro de aire, evidenciándose una variación del 31% entre la comparación. En esta etapa al encontrarse simulado una falla en saturación de filtro existe menor entrada de aire a cada uno de los cilindros del motor, provocando una mezcla inadecuada de aire combustible, evitando que la fase de trabajo sea la óptima, en esta punto la ECU compensa con un menor tiempo de apertura de inyector, se produce mayor contaminación por emisiones de Hc y se hace notoria la pérdida de potencia en el motor, también se tiene como resultado degradación de elementos como bujía, sensor de oxígeno y catalizador del vehículo, las mismas se pueden evidenciar en el documento [21], en el capítulo 6 en donde se muestra la diferencia de señales de sensores sometidos a fallos.

Tabla 3 Cálculo de la media, estándar y varianza de la falla de filtro de aire.

	Media	Desviación Standard	Varianza
Fallo de filtro de aire	0.1466	0.2010	0.04043
Motor ok	0.4858	0.2734	0.07475

Para poder apreciar de mejor manera los resultados obtenidos de las diferencias que existen entre los fallos provocados y con el motor "ok" se ha realizado "un diagrama de cajas" de cada fallo. El diagrama de cajas es un gráfico que muestra un resumen de una gran cantidad de datos, medidas descriptivas, además de intuir su morfología y simetría. Este tipo de gráficos nos permite identificar valores atípicos y comparar distribuciones, esto se puede visualizar a continuación.



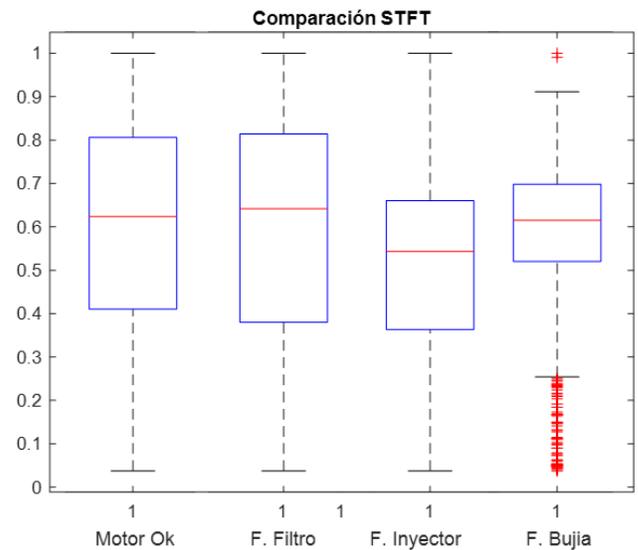
**Figura 8** Fallo de bujía con respecto al sensor de oxígeno O2.

En la figura 8 se denota una clara diferencia entre las señales de motor ok y motor con fallas forzadas, lo cual está representado por la aparición de asteriscos en las cajas de las medianas en las que se puede identificar que en ellas existen valores atípicos en la medición, los mismos que corroboran que existen anomalías en el funcionamiento del motor.

**Tabla 4** valores de la media en la comparación del sensor de oxígeno.

	Motor Ok	F. Filtro	F. Inyector	F. Bujía
Valor	0.63	0.53	0.61	0.85

Como se puede apreciar en la tabla 4 existe una diferencia entre el promedio del motor ok en un valor de 0.63V en el sensor de oxígeno y el producto de la falla del filtro de 0.53V, de igual manera se puede distinguir los valores de voltaje de inyector 0.61V cuando este se encuentra en fallo y los valores en fallo de la bujía entregando un resultado de 0.85, es decir al aumentar o disminuir la amplitud de la señal del sensor de oxígeno se logra dos estados en el motor, mezcla rica y mezcla pobre, entonces al tener una saturación de filtro de aire obtenemos una respuesta directa del cambio de amplitud de la señal del sensor de oxígeno cambiando a mezcla pobre el motor, generando una pérdida de potencia en el motor.



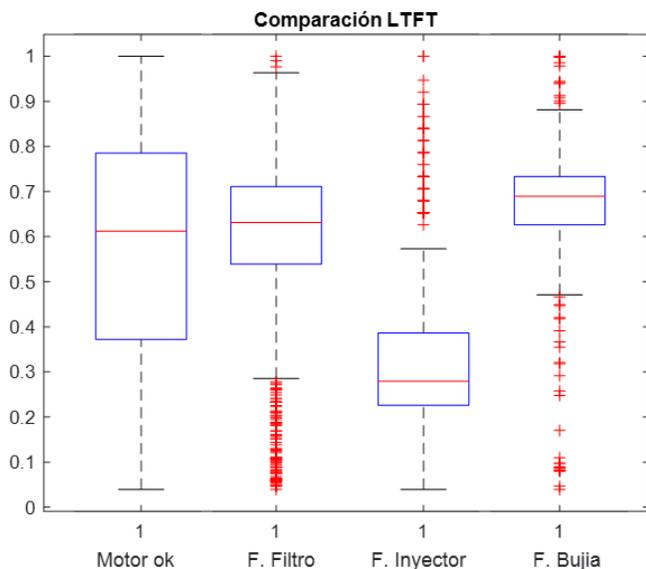
**Figura 9** Fallo de filtro de aire con respecto al sensor de oxígeno.

En la figura 9 se denota una clara diferencia entre las señales de motor ok y motor con fallas forzadas, lo cual está representado por la aparición de asteriscos en las cajas de las medianas en las que se puede identificar valores atípicos, los mismos que muestran una desproporción en los resultados estadísticos de falla de bujía lo cual corrobora que existen anomalías en el funcionamiento del motor.

**Tabla 5** Cálculo de la media, estándar y varianza de la falla de filtro de aire.

	Motor Ok	F. Filtro	F. Inyector	F. Bujía
Valor	0.63	0.65	0.57	0.60

Como se puede apreciar en la tabla 5 existe muy poca diferencia en el ajuste a corto plazo ya que el motor Ok y el motor con falla del filtro presentan valores muy similares los cuales son corregidos mediante la ECU del vehículo además activa porcentualmente la apertura de los inyectores en función de la señal de sensor de oxígeno.



**Figura 10** Fallo de inyector con respecto al sensor de oxígeno.

En la figura 10 se visualiza el gráfico de cajas se representa el Q1 que corresponde al 25% de datos y se marca de color azul en el primer extremo de la caja y el Q3 con el 75% de datos que se marca en color azul en el segundo extremo de la caja, además podemos verificar la línea roja central que corresponde a Q2 con el 50% de los datos y sus correspondientes bigotes que son líneas que se extienden desde la caja, finalizando los límites superior e inferior podemos notar valores atípicos superiores a 0,6v donde muestran valores más grandes o pequeños en relación al resto de datos obtenidos o su debida traducción como errores en la toma de datos.

Podemos identificar que Q2 o también denominada mediana se estabiliza en valores de voltaje de sensor de oxígeno entre 0,3v que corresponde al segmento de mezcla pobre en donde existe un ajuste de combustible a largo plazo para lograr valores a 0% en lo posterior con un ajuste a corto plazo, esto se traduce de manera que la ECU trata de compensar en una manera más larga de tiempo con una mezcla pobre para que no exista en desequilibrio considerable en el motor, con este efecto se desenlaza en una pérdida de potencia debido al rango bajo de combustible en los cilindros y por ende menor contaminación con una alta presencia de oxígeno.

n

**Tabla 6** Cálculo de la media, estándar y varianza de la falla de filtro de aire.

	Motor Ok	F. Filtro	F. Inyector	F. Bujía
Valor	0.63	0.66	0.29	0.70

Como se puede apreciar en la tabla 6 existe una diferencia de voltaje del ajuste de largo plazo ya que se miden en intervalos de tiempo más largos mediante sensores de relación de combustible de oxígeno o aire después del convertidor catalítico y en la práctica, los voltajes de señal que generan estos sensores no están directamente implicados en las estrategias de

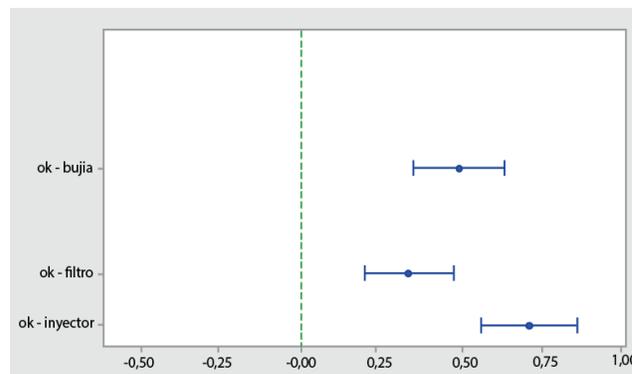
suministro de combustible el propósito principal de los sensores de oxígeno es monitorear la eficiencia del convertidor catalítico, lo cual se logra por medio de la ECU comparando su voltaje de señal con el del sensor de oxígeno. De la misma forma se compara con el patrón de cambios en el voltaje de la señal del sensor de oxígeno, y en base a las diferencias o similitudes entre los patrones de voltaje de la señal, la ECU calcula un valor de compensación.

#### 4.2. Análisis de fallos mediante ANOVA

Si hay una diferencia en el valor promedio (media) entre 3 o más grupos, se debe realizar un análisis anova para lo cual se analiza la media, la desviación típica, el resultado es el intervalo de confianza del 95% (por defecto) para la media correspondientes a la variable dependiente para cada uno de los grupos definidos por el factor se usa la prueba de análisis de varianza (ANOVA). En donde se debe usar pruebas repetidas para que el resultado sea más eficiente. Por esta razón antes de realizar la prueba, la muestra debe cumplir con ciertos parámetros según los análisis que se apliquen. [20].

**Tabla 7** Factores en el análisis Tukey.

Factor	Niveles	Valores
respuesta	4	bujía; filtro; inyector; ok



**Figura 11** Comparación anova del sensor de oxígeno.

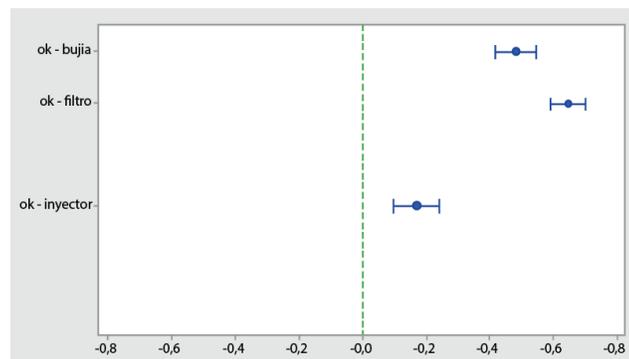
En la figura 11 podemos observar el trabajo del ajuste de combustible que es justamente lo que hace fluctuar los datos estadísticos del sensor de oxígeno por lo que las medias son valores diferentes y los bigotes se cruzan entre si en el cual muestran. [21].

**Tabla 8** Valores de respuesta estadística del O2.

Respuesta	N	Media	Desv.Est.
Bujía	2550	-0,5269	1,8253
Filtro	2339	-0,4876	2,1964
Inyector	1872	-0,8898	1,7698

<b>Motor Ok</b>	2401	-0,0580	1,9175
-----------------	------	---------	--------

Como podemos observar en la tabla 8 se puede notar una clara diferencia entre las medias estadísticas de las comparaciones del motor ok con respecto a las fallas ocasionadas, esto aporta en gran medida al comportamiento del motor y su diferenciación con el fallo, en el caso de fallo de bujía y de inyector, la ECU trata de realizar ajustes que eviten siga prolongándose el fallo hasta que exista la intervención técnica de corrección, en ambos casos existe mayor medida de combustible en consumo de motor para compensar el fallo a costa del mayor consumo de combustible y mayor degradación del motor, mientras que en el caso de saturación de filtro el cambio a mezcla pobre es notorio y por consiguiente la menor potencia en el motor.



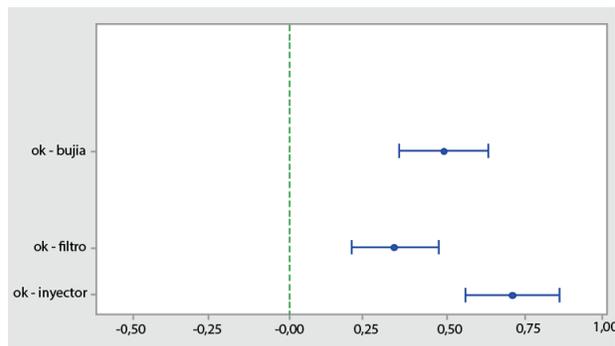
**Figura 12** Comparación anova del STFT.

En la figura 12 se puede visualizar los ajustes de combustible a corto plazo se producen como resultado directo de cambios en el contenido de oxígeno de la corriente de escape. La corriente de escape es monitoreada por un sensor de oxígeno aguas arriba del convertidor catalítico, durante el funcionamiento normal del vehículo, y siempre que el sensor de oxígeno esté en funcionamiento de circuito cerrado, la ECU reaccionará a los cambios en la composición del flujo de escape casi instantáneamente, de ahí el término “recorte de combustible a corto plazo”, y lo hará varias veces por segundo. [22].

**Tabla 9** Valores de respuesta estadística del STFT.

Respuesta	N	Media	Desv.Est.
<b>Bujía</b>	4683	-0,6445	1,0887
<b>Filtro</b>	1500	-0,16601	0,4411
<b>Inyector</b>	2208	0,000000	0,000000
<b>Motor Ok</b>	3671	-0,6129	0,8598

Como podemos observar en la tabla 9 los valores de respuesta estadísticos del STFT demuestran que sus valores de la media son muy similares lo que da a notar que por ejemplo este valor no aporta a la diferencia de los fallos.



**Figura 13** Comparación anova del LTFT.

En la figura 13 podemos corroborar este criterio al observar que los puntos de distribución de medias y los bigotes de línea horizontal se cruzan entre sí.

**Tabla 10** Valores de respuesta estadística del LTFT.

Respuesta	N	Media	Desv.Est.
<b>Bujía</b>	2520	-0,5869	1,8253
<b>Filtro</b>	2439	-0,4276	2,1964
<b>Inyector</b>	1782	-0,8098	1,7698
<b>Motor Ok</b>	2601	-0,0980	1,9175

En la tabla 10 se puede observar que los valores de la media son muy similares en cada comparación que se realiza con las diferentes fallas ocasionadas al motor por lo cual existe una mayor similitud entre sus fallos en el ajuste de combustible a largo plazo.

### 1.1. Identificación del modo de falla, efecto y criticidad en el vehículo

En la provocación de fallos se valora los efectos del comportamiento del sistema del vehículo, ya sea con fallo provocado o fallo en el sistema, estas pueden ser: aumento / disminución de nivel de consumo de combustible, mayor / menor emisiones de gases contaminantes, testigo en el tablero de la señal (Check engine).

Se considera también el aumento de ruido, vibración, etc. En el suceso de las consecuencias, éstas son referenciadas a las impresiones obtenidos de la falla en los diversos destinos de interés. Se toma en cuenta las consecuencias a la seguridad del medio ambiente, de las personas y prestaciones del vehículo. [23].

Después de haber obtenido los resultados en base a los tres tipos de fallos provocados y verificar el efecto que provoca en el automóvil, se debe programar y ejecutar una adecuada tarea de mantenimiento dependiendo del daño ya sea preventiva, predictiva o correctiva para así disminuir los tiempos de parada innecesarios reduciendo las pérdidas económicas y las altas emisiones de gases contaminantes. [24]

### 1.2. Efectos y consecuencias de las fallas

En la primera falla ocasionada se puede observar un incremento de entrada de dosado rico

**Tabla 11** Efectos de la falla ocasionada del filtro de aire.

FALLA OCACIONADA	EFFECTOS
FILTRO DE AIRE	Consumo de combustible
	Excesiva emisión de CO
	Excesiva emisión de HC
	Corrección inestable del O2
	Desgaste de bujías
	Fallos en las señales de los sensores

Las consecuencias de esta falla presentan un impacto al medio ambiente debido al incremento de la emisión de gases contaminantes y contaminación auditiva por las detonaciones producidas en la combustión, además el vehículo reduce su rendimiento por lo cual incomoda al conductor.



**Figura 14** desgaste de la bujía.

En la figura 14 se puede evidenciar el desgaste de la bujía por la disminución de inyección ya que hay poca presencia de oxígeno en la mezcla.

En la segunda falla ocasionada se puede visualizar la disminución de la entrada de dosado rico.

**Tabla 12.** Efectos de la falla ocasionada del inyector.

FALLO OCACIONADO	EFFECTOS
FALLO DEL INYECTOR	Arranque lento
	Disminución del consumo de combustible
	Inestable en ralentí
	Perdida de torque y potencia
	Tambaleo
	Se enciende el testigo en el tablero del Check engine

Las consecuencias de los efectos especificados en la tabla 12 los cuales ocasionan un incremento de los gases contaminantes, incremento de los costos de mantenimiento, incremento de

consumo de combustible, disminución de las prestaciones del vehículo y un deterioro de los elementos de alimentación de combustible.



**Figura 15** humo negro.

En la figura 15 se puede observar la presencia de combustible en el tubo de escape debido a la falla de un inyector el cual inyecta demasiado combustible a la cámara.

En la tercera falla ocasionada se puede observar un aumento de dosado rico

**Tabla 13.** Efectos de la falla ocasionada de la bujía.

FALLO OCACIONADO	EFFECTOS
FALLO DE LA BUJIA	Inestable en marcha mínima
	Agitamientos del motor
	Vibraciones del motor
	Presencia de combustible en el tubo de escape
	Mayor consumo de combustible
	Elevadas emisiones de hidrocarburos



**Figura 16** humo negro.

En la figura 16 se puede observar la presencia de humo negro en el tubo de escape porque tiene una falla en una de las bujías

por lo cual la ECU entra en modo de falla por lo cual el vehiculo queda el motor vibrando.

Donde P= probabilidad de ocurrencia, G= gravedad del fallo y D=probabilidad de no detección.

### 1.3. Determinación de la probabilidad de ocurrencia

La probabilidad de ocurrencia es un valor entre 1 (mínima probabilidad) y 10 (máxima probabilidad) que indica la probabilidad de que el fallo ocurra. Si bien no existen unas reglas normalizadas para la valoración de la probabilidad de ocurrencia, en la tabla se indican unos criterios de valoración que pueden servir de referencia.

**Tabla 14.** Tabla de probabilidad de ocurrencia

Criterio	Probabilidad
Casi improbable	1 - 2
Baja probabilidad	3 - 4
Probable	5 - 6
Alta probabilidad	7 - 8
Casi con certeza	9 - 10

### 1.4. Determinación de la gravedad del fallo

La gravedad del fallo es un valor entre 1 y 10, que indica la influencia del fallo en el grado de satisfacción del conductor (en el caso del AMFE de diseño), o la perturbación que el fallo pueda producir en el proceso productivo (para el AMFEC de proceso).

**Tabla 15.** Tabla de la gravedad del fallo.

Criterio	Índice
Casi improbable	1 - 2
Baja probabilidad	3 - 4
Probable	5 - 6
Alta probabilidad	7 - 8
Casi con certeza	9 - 10

### 1.5. Determinación de la probabilidad de no detección

Indica la probabilidad de no detectar el fallo antes de entregar el vehiculo al cliente (para el AMFE de diseño), o durante su fabricación (para el AMFE de proceso). Al igual que en los casos anteriores toma valores comprendidos entre 1 y 10.

**Tabla 16.** Tabla de probabilidad de no detección.

Criterio	Probabilidad
Casi improbable	1 - 2
Baja probabilidad	3 - 4
Probable	5 - 6
Alta probabilidad	7 - 8
Casi con certeza	9 - 10

### 1.6. Determinación del índice de prioridad de riesgo (IPR)

Se calcula el I.P.R. de acuerdo a la fórmula:  $IPR = P \cdot G \cdot D$ , para cada uno de los fallos.

**Tabla 17.** Análisis del IPR.

Modo de falla	Efectos	P	G	D	IPR
Inyector	Arranque lento	5	8	5	200
Bujía	Presencia de combustible en el tubo de escape	5	7	5	245
Filtro de aire	Corrección inestable de la ECU en base a la señal del sensor O2	6	8	5	112

En base a la investigación (Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) del sistema de inyección de un motor de encendido provocado corsa Evolution 1.4 L empleando herramientas de aprendizaje y clasificación para la programación del mantenimiento [26]), se muestran los resultados en la tabla 17, en el cual corrobora a los resultados obtenidos en los histogramas antes expuestos dando a comprobar como fallo más crítico.

El ajuste de combustible siempre interactua de manera opuesta a la combustión, es decir, cuando se detecta una mezcla rica intenta compensar para empobrecer la misma, y viceversa. Si la ECU por alguna razón observa que tiene una condición de mezcla rica (fluctuación de una señal del sensor de oxígeno por encima de 450 mv) enseguida procede a un ajuste positivo a corto plazo (+10% por ejemplo), es decir se puede concluir que existe un problema de fallo en el vehiculo.

### 1.7. Ponderación de datos de los fallos ocasionados

En base a los resultados obtenidos se concuerda que el incremento de consumo de combustible es inducido por la falla del cable de bujía que se le atribuye un 62,66% al incremento total las cuales pueden provocar daños al vehículo y al conductor debido al estrés. [25].

Se puede corroborar que en la tabla 17 que la falla de una bujía afecta a los componentes del motor entre los cuales al tener presencia de combustible en el tubo de escape daña componentes como el sensor de oxígeno y a su vez el catalizador que disminuye las emisiones de los gases contaminantes.

Después de ver cuál es el fallo más crítico se puede proceder a planes de mantenimiento para el vehiculo, basados en recomendaciones del fabricante, determinados en periodos fijos, aplicando un mantenimiento correctivo, es decir, reparar hasta que falla se resuelva.

**Tabla 18.** Tabla de la gravedad del fallo. [26].

Falla ocasionada	Tarea de mantenimiento
------------------	------------------------

Motor ok	No se realiza mantenimiento
Inyector	Mantenimiento preventivo
Bujía	Mantenimiento correctivo
Filtro de aire	Mantenimiento preventivo

En la tabla 18 se plantea el mantenimiento recomendado en base a criterios de riesgo y confiabilidad, de manera que además de asegurar la vida útil del motor, administrando las acciones de mantenimiento en el rendimiento, se tenga decisiones correctas para disminuir, evaluar y controlar el riesgo. [26].

### CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se logró obtener valores estadísticos en la recolección de datos pues en algunos casos se presentan lecturas de valores atípicos que muestran claramente un fallo en el motor y repercusión en la toma de datos obtenidos en el vehículo, estos datos ratifican la toma de decisiones para una adecuada tarea de mantenimiento, ya sea correctiva, preventiva o predictiva logrando alargar el tiempo de funcionamiento correcto del vehículo, evitando detener el mismo de forma imprevista generando pérdidas económicas y reducción de emisiones contaminantes.

La comparación en gran medida con el sensor de oxígeno se da pues directamente podemos apreciar de mejor manera los efectos causados por un fallo en niveles de aumento de combustible o disminución del mismo ya que no existe una diferencia notable en los PID's de ajuste de corto y largo plazo.

Un efecto crítico de los fallos provocados es la desconexión de un cable de bujía pues generan descompensación de trabajo en uno de los cilindros, la misma repercute directamente en la compensación por parte de la ECU corrige de manera urgente en el motor para que este continúe funcionando, lógicamente al generarse este fallo inmediatamente se enciende el CHECK ENGINE y el motor realiza las correcciones de mezcla, abriendo de manera más prolongado los inyectores generando una mezcla rica, la misma que luego de cumplir con el proceso de combustión se transforma en gases de escape.

Las fallas generadas en estado estacionario fueron de resultados muy similares al motor en buen funcionamiento y por eso se tomó en cuenta el estado transitorio ya que presentó valores altos en la comparación de los histogramas y por lo cual se corrobora con el análisis AMFEC.

Los efectos causados por un fallo de saturación en el filtro causan que la cantidad de aire que pasa al cilindro disminuya, logrando directamente que la ECU trate de compensar la cantidad de combustible y que la mezcla sea estequiométrica, este fallo logra en el motor pérdida de potencia a consecuencia que el sensor de oxígeno nota esta variación en los gases combustiónados y envía la señal a la ECU solicitando que este baja el nivel de combustible lo cual incide directamente en el tiempo de apertura de los inyectores bajando la cantidad de combustible en la inyección pero perdiendo notablemente la potencia del motor.

### REFERENCIAS

- [1] Kuschel, J., Fagrell, H., & Andersson, C. J. (2004, September). A prototype for remote vehicle diagnostics. In *International Conference on Mobile Human-Computer Interaction* (pp. 361-365). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Suresh, A., Udendhran, R., & Balamurugan, M. (2020). Integrating IoT and Machine Learning—The Driving Force of Industry 4.0. In *Internet of Things for Industry 4.0* (pp. 219-235). Springer, Cham.
- [3] Delnevo, G., Di Lena, P., Mirri, S., Prandi, C., & Salomoni, P. (2019). On combining Big Data and Machine Learning to support eco-driving behaviours. *Journal of Big Data*, 6(1), 64.
- [4] Wamba, S. F., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., & Gnanzou, D. (2015). How 'big data' can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. *International Journal of Production Economics*, 165, 234-246.
- [5] Aithal, S. M., & Balaprakash, P. (2019, June). MaLTeSE: Large-Scale Simulation-Driven Machine Learning for Transient Driving Cycles. In *International Conference on High Performance Computing* (pp. 186-205). Springer, Cham.
- [6] Schudeleit, M., Gu, W., Kükükay, F., & Zhang, M. (2017). Fuel and CO2 savings in real driving using machine learning HEV operating strategy. In *17. Internationales Stuttgarter Symposium* (pp. 659-677). Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [7] Wang, Z., Wu, Y., Zhou, Y., Li, Z., Wang, Y., Zhang, S., & Hao, J. (2014). Real-world emissions of gasoline passenger cars in Macao and their correlation with driving conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4), 1135-1146.
- [8] Murphey, Y. L., Chen, Z. H., & Feldkamp, L. A. (2008). An incremental neural learning framework and its application to vehicle diagnostics. *Applied Intelligence*, 28(1), 29-49.
- [9] Chandrasiri, N. P., Nawa, K., & Ishii, A. (2016). Driving skill classification in curve driving scenes using machine learning. *Journal of Modern Transportation*, 24(3), 196-206.
- [10] Hung, W. T., Tong, H. Y., Lee, C. P., Ha, K., & Pao, L. Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(2), 115-128.
- [11] Astaiza Castro, M. F. (2019). Diseño de una metodología para construir un ciclo de conducción por medio de micro-trips y análisis de clústeres.
- [12] Cabrera Palacios, A. P., & Chiluitza Luna, B. M. (2018). Desarrollo de un algoritmo mediante análisis de aprendizaje automático para la detección de fallos en vehículos M1 con motores de encendido provocado (Bachelor's thesis).
- [13] Cedeño, E. A. L., Rocha-Hoyos, J. C., Zurita, D. B. P., & Milla, J. C. L. (2018). Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura. Caso de estudio Quito, Ecuador. *Enfoque UTE*, 9(2), 149-158.
- [14] Argudo Mosquera, V. A., & Ríos Vásquez, M. C. (2016). Influencia del paisaje urbano sobre la comunidad de aves en el sistema ripario de la ciudad de Cuenca (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- [15] Llanzi, F., Ernesto, I., Inga, I., & Santiago, H. (2017). Análisis de modos de falla del sistema de inyección electrónica de combustible Multec Delphi (Bachelor's thesis).
- [16] Tejada Arellano, G. E. (2014). Diseño e implementación de un calentador de combustible en un automóvil Volkswagen Gol modelo 2005 como posible solución a la excesiva emisión de gases nocivos (Bachelor's thesis, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL. FACULTAD: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA).
- [17] Sirait, A. M. (2001). Analisis Varians (ANOVA) dalam Penelitian Kesehatan. *Media Penelitian dan Pengembangan Kesehatan*, 11(2).
- [18] Terrádez, M., & Juan, A. A. (2003). Análisis de la varianza (ANOVA). línea]. Disponible en: <http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/ANOVA.pdf>. [Último acceso: 07/08/2014].
- [19] Gómez, O. S., Díaz, J. C., & Aguilar, R. A. (2013). Paradigma Experimental en la Ingeniería de Software—Caso Programación en Pareja. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, 1(4), 135-141.
- [20] Ortiz Ortiz, J. B. (2015). Diseño de un sistema de diagnóstico de fallas basado en eventos discretos para un sistema de nivel de líquido (Master's thesis).

- [21] Bravo Piedra, J. F., & Guanuche Quezada, M. A. (2019). Estudio de las señales analógicas y digitales de los sistemas electrónicos del motor de encendido provocado mediante simulación de averías (Bachelor's thesis).
- [22] España, E. A. R. Procedimientos de diagnóstico y corrección de averías en sistemas electrónicos de inyección automotriz computarizados (gasolina), sin equipo costoso de diagnosis.
- [23] Mateu Segura, R. (2018). Estudio del impacto de sistemas de admisión en un motor de encendido provocado (Doctoral dissertation).
- [24] Racines Buele, E. J., & Páez Pazmiño, Á. D. (2018). Estudio del consumo de combustible utilizando un dispositivo electrónico.
- [25] Herrera-Galán, M., & Duany-Alfonso, Y. (2017). Processes validation with initial analysis of criticality applied to obtaining the active ingredient policosanol (PPG). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(1), 124-132.
- [26] Aguilar Romero, A. Y., & Tandazo Flores, L. F. (2017). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) del sistema de inyección de un motor de encendido provocado corsa Evolution 1.4 L empleando herramientas de aprendizaje y clasificación para la programación del mantenimiento (Bachelor's thesis).
- [27] Hoz Hernández, J. M. D. L. (2019). Procedimiento de diseño de sistemas mecánicos basado en análisis funcional, AMFEC, RAMS e ISO GPS.
- [28] Aguilar-Otero, J. R., Torres-Arcique, R., & Magaña-Jiménez, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1), 15-26.