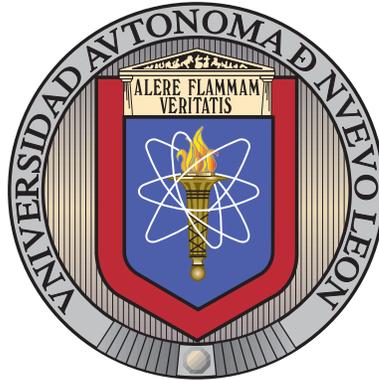


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

POSGRADO



ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS  
VIBRACIONES PROVOCADAS POR LA  
AUTOIGNICIÓN Y LA ENERGÍA LIBERADA EN  
CÁMARA EN UN MEP

POR

I. F. MARÍA JOSÉ CARBAJAL PÉREZ

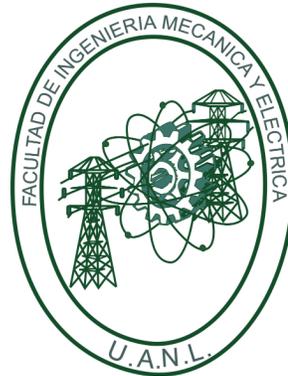
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

POSGRADO



ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS  
VIBRACIONES PROVOCADAS POR LA  
AUTOIGNICIÓN Y LA ENERGÍA LIBERADA EN  
CÁMARA EN UN MEP

POR

I. F. MARÍA JOSÉ CARBAJAL PÉREZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2022

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Análisis de la relación entre las vibraciones provocadas por la autoignición y la energía liberada en cámara en un MEP”, realizada por la estudiante María José Carbajal Pérez, con número de matrícula 2081679, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

Dr. Simón Martínez Martínez  
Director

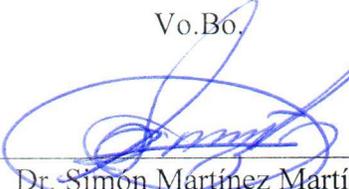
M.C. Luis Fernando Rúa Mojica  
Co-Director

Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz  
Revisor

M.C. Miguel García Yera  
Revisor

Dr. Diego Francisco Ledezma Ramírez  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4103

Ciudad Universitaria, a 26 de octubre de 2022.

*Siempre todo al autor  
del átomo primigenio.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>XII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	3
1.2.1. Detección de la autoignición en un motor de encendido provocado	4
1.2.2. Progreso en la detección de la autoignición por medio del espectro de vibraciones . . . . .	7
1.3. Hipótesis . . . . .	8
1.4. Objetivos . . . . .	9
1.4.1. Objetivo General . . . . .	9
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	9
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>10</b>
2.1. Ciclo termodinámico: Ciclo Otto . . . . .	11

2.2.	Fenómenos anormales en el proceso de combustión . . . . .	14
2.2.1.	Autoignición . . . . .	14
2.2.2.	Detección de autoignición . . . . .	16
2.2.3.	Resistencia a la autoignición . . . . .	16
2.3.	El motor de relación de compresión variable . . . . .	20
2.4.	Combustibles alternativos . . . . .	21
2.5.	Señales ondulatorias y el análisis de frecuencias . . . . .	24
2.5.1.	Transformada de Fourier . . . . .	25
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>28</b>
3.1.	Instrumentos y materiales . . . . .	29
3.1.1.	Motor tipo CFR . . . . .	29
3.1.2.	Modos de operación en el motor . . . . .	30
3.1.3.	Inductores e instalación . . . . .	32
3.1.4.	Análisis preliminar del comportamiento vibratorio . . . . .	33
3.2.	Matriz y tipo experimental . . . . .	34
3.2.1.	Condiciones experimentales . . . . .	35
3.2.2.	Identidad vibratoria . . . . .	36
3.2.3.	Detección del nivel de autoignición . . . . .	39
3.2.4.	Procesamiento de datos . . . . .	43
<b>4.</b>	<b>Identidad vibratoria y detección de autoignición</b>	<b>44</b>

---

4.1. Validación de metodología . . . . .	45
4.2. Identidad vibratoria . . . . .	46
4.2.1. Gasolina . . . . .	46
4.2.2. Etanol . . . . .	50
4.2.3. Iso-octano . . . . .	51
4.3. Detección y parametrización de autoignición . . . . .	54
4.3.1. Gasolina . . . . .	55
4.3.2. Etanol . . . . .	56
4.3.3. Iso-octano . . . . .	57
4.3.4. Análisis conjunto y parametrización . . . . .	58
4.4. Carga energética de la señal . . . . .	61
<b>5. Conclusiones y perspectivas</b>	<b>62</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	63
5.1.1. Identidad vibratoria y carga energética de la señal . . . . .	63
5.1.2. Comparativa para detección y parametrización de autoignición	65
5.2. Perspectivas a futuro . . . . .	67
<b>A. Fichas técnicas</b>	<b>68</b>
A.1. Hoja de datos para acelerómetro 352C22 . . . . .	69
A.2. Hoja de datos para analizador Photon+ Dynamic Signal Analyzer . .	71
A.3. Hoja de datos para el Vibrómetro Digital PDV-100 . . . . .	72

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Proceso de 4 tiempos en el motor. . . . .	11
2.2. Diagrama presión-volumen para el análisis de un ciclo ideal. . . . .	12
2.3. Diagrama presión-volumen para el análisis de un ciclo real. . . . .	13
2.4. Gráfica representativa de presión interna en cámara: a) proceso de combustión normal, b) proceso de combustión anormal con alto nivel de autoignición. . . . .	15
2.5. Diagrama presión-temperatura zonas de intensidad de autoignición (adaptada de Wang et al. [23]). . . . .	20
3.1. Historia de tiempo para la componente Y, muestra de tipos de operación combustión-arrastre. . . . .	34
3.2. Detalle para historia de tiempo en la componente Y. . . . .	35
3.3. Diagrama de metodología para identidad vibratoria y detección del nivel de autoignición. . . . .	36
3.4. Matriz experimental general para identidad vibratoria y detección de nivel de autoignición. . . . .	37
3.5. Detalle para historia de tiempo en la componente Y con filtrado pasa altas de 2 Hz. . . . .	39

---

3.6. Magnitud para Transformada de Fourier en la componente Y . . . . .	40
3.7. Ventana de autoignición por espectro de frecuencias. . . . .	41
3.8. Intensidad de autoignición considerando el pico máximo de la señal de combustión en vibración. . . . .	42
3.9. Tipo de señal en su equivalente de ángulo de cigüeñal. . . . .	43
4.1. Primer resultado de análisis por vibrómetro para Etanol. . . . .	45
4.2. Espectro de frecuencias para etanol por acelerómetro (izquierda) y vibrómetro (derecha). . . . .	46
4.3. Identidad vibratoria para gasolina comercial con temperatura de ai- re de admisión a 38 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z. . . . .	47
4.4. Identidad vibratoria para gasolina comercial con temperatura de ai- re de admisión a 68 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z. . . . .	48
4.5. Identidad vibratoria para etanol con temperatura de aire de admisión a 38 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z. . .	49
4.6. Identidad vibratoria para etanol con temperatura de aire de admisión a 68 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z. . .	51
4.7. Identidad vibratoria para iso-octano con temperatura de aire de admi- sión a 38 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z. . . . .	52
4.8. Identidad vibratoria para iso-octano con temperatura de aire de admi- sión a 68 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z. . . . .	53

---

4.9. Parametrización de autoignición de acuerdo a la vibración del bloque del motor para gasolina. . . . .	55
4.10. Parametrización de autoignición de acuerdo a la vibración del bloque del motor para etanol. . . . .	56
4.11. Parametrización de autoignición de acuerdo a la vibración del bloque del motor para iso-octano. . . . .	57
4.12. Pico máximo de presión interna en cámara promediado para todos los combustibles. . . . .	58
4.13. Intensidad de autoignición por presión interna en cámara promediada para todos los combustibles. . . . .	59
4.14. Intensidad de autoignición por vibración promediada para todos los combustibles. . . . .	60
4.15. Carga energética de la señal. . . . .	61

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Condiciones de operación para determinar números de octano. . . . .	21
3.1. Características generales del motor CFR. . . . .	30
3.2. Especificaciones del analizador de gases. . . . .	31
3.3. Especificaciones del acelerómetro. . . . .	32
3.4. Especificaciones del acelerómetro. . . . .	38

# AGRADECIMIENTOS

---

Al Dr. Simón Martínez por permitirme colaborar y ser parte del equipo de laboratorio de Fisicoquímica de la combustión y a su vez por su confianza en la asignación de este trabajo como tema de tesis.

Al M.C. Luis Rúa por su apoyo como co-director de tesis y sus enseñanzas en el laboratorio, así como la confianza depositada para la finalización del proyecto.

Al Dr. Diego Ledezma que sin su aporte y apoyo no hubiera sido posible lograr las principales metas de este trabajo.

Al Ing. Francisco Salas que fue un excelente compañero de laboratorio y de proyecto, siempre presto a ayudar y compartir el conocimiento.

Agradezco grandemente a mi familia que sin su apoyo y soporte no estaría finalizando este proyecto, a mis amigos aquí y allá, a Diego Quijano en especial que fue novio y confidente, por estar ahí aún cuando habían algunos miles de kilómetros entre nosotros.

Al Grupo de Energías Térmica y Renovable por su apoyo y consejo para hacer crecer y mejorar la temática del proyecto.

Al Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad en Bio-combustibles y al Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética por sus instalaciones prestadas para poder llevar a cabo este proyecto.

Adicionalmente, agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León por la

---

financiación del proyecto PAYCIT con nombre “Caracterización experimental de la emisión de nanopartículas durante el proceso de combustión en un motor de encendido provocado con gasolinas mexicanas, alcoholes puros y mezclas oxigenadas”, cuya clave de registro es 489-IT-2022.

Al CONACyT por la beca de posgrado otorgada (CVU): 809648. De igual manera a todos los involucrados en la realización del proyecto.

# RESUMEN

---

I. F. María José Carbajal Pérez.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS VIBRACIONES PROVOCADAS POR LA AUTOIGNICIÓN Y LA ENERGÍA LIBERADA EN CÁMARA EN UN MEP.

Número de páginas: 77.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la liberación energética por vibraciones en relación a la intensidad de autoignición y el trabajo generado al interior, a través de la detección del espectro de vibraciones en la estructura externa de la cámara de combustión para establecer su relación con la eficiencia energética.

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** Por medio del estudio realizado pudieron encontrarse patrones vibratorios característicos del motor y al tipo de combustible en particular, para el cual se encuentran diferencias notorias pero se requiere profundizar el estudio. Del mismo modo, es posible detectar el nivel de autoignición y hacer una comparación directa con la energía liberada en cámara. Así mismo, es corroborar esto con otra metodología enfocada en la medición de vibraciones que permita hacer más definida la toma de datos y su clasificación.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Simón Martínez Martínez

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*En este capítulo, se proporciona un contexto general sobre la temática que se desarrolla en la actualidad en el país y en el mundo, así como sus causas. Además, se presentan algunos conceptos sobre la importancia de desarrollar este tipo de experimentos y lo que representan para el desarrollo del tema. Como parte de este capítulo también se considera el planteamiento de la tesis, sus objetivos generales y el resultado esperado con ellos.*

## 1.1 MOTIVACIÓN

En años recientes, muchas organizaciones a lo largo del mundo han reunido esfuerzos para promover el cambio energético de distintos sectores, entre los cuales se destacan el sector de transporte y el de energía. En septiembre de 2019 en la Asamblea General de las Naciones Unidas se aprueba la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, esta incluye la realización de 17 objetivos con impacto social, económico y ambiental en un plazo de 15 años. El objetivo 7 y 13 proponen un impacto fuertemente enlazado a la eficiencia energética, promover desarrollo tecnológico y reducir los contaminantes provenientes de combustibles fósiles, y al mismo tiempo reforzar los compromisos que se han implementado en la Convención Marco de Naciones Unidas en años previos [1].

Este tipo de acuerdos han buscado promover la reducción de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, en la Convención del Cambio Climático de 1992 se instaba a implementar regulaciones en distintos sectores, posteriormente se organiza el Protocolo de Kyoto (1998) y el Acuerdo de París (2015), donde ambos tienen como objetivos reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [2]. A partir de este tipo de acuerdos se ha promovido la implementación de regulaciones como normativa obligatoria en el sector del transporte, industria y energía.

La importancia de esto ha radicado principalmente en el tipo de emisiones que se generan por sector, en la Unión Europea el principal consumidor de energía era el transporte con un 33 % en el 2016, del cual el 82 % pertenece al tipo de consumo de energía por automotores. De la misma manera, a nivel mundial el 25 % de las emisiones de dióxido de carbono pertenecen al sector de transporte, que solo son superadas por el sector de producción de electricidad y calor [2]. En México pasa algo semejante para el caso de Gases de Efecto Invernadero, sin embargo, en ese caso el sector de transporte encabeza la lista con un aporte del 36 % [3]. Si bien en México se han implementado ciertas normativas al respecto, no es posible decir que

van al mismo nivel de la Unión Europea, puesto que lleva un gran retraso para su implementación. En soporte a este tipo de esfuerzos, es necesario enfocar el desarrollo tecnológico y la investigación hacia la mejora constante de la eficiencia en motores y la reducción de las emisiones contaminantes que puedan generar.

## 1.2 ANTECEDENTES

Uno de los fenómenos en la combustión que pueden producir un incremento drástico en la emisión de gases contaminantes es el *knock*, que se cataloga como efecto de la alta intensidad de la autoignición, esto debido a que las temperaturas dentro de la cámara incrementan súbitamente. Además, genera otros problemas por ejemplo: el ruido no deseado, las variaciones en potencia, incremento en el consumo de combustible y poca durabilidad del motor [4]. Se conoce que la aparición de altos niveles de autoignición limitan la eficiencia, sin embargo niveles ligeros pueden mejorar el rendimiento de la potencia [5]. Este tipo de anomalía de nivel elevado por ende se traduce en un decremento de la eficiencia energética y a su vez también en un incremento de la exergía destruida [6]. Considerando la transformación energética de las vibraciones por autoignición, actualmente no existen acercamientos a esta faceta del análisis de la combustión en automotores. Existe suficiente información de otro tipo de pérdidas energéticas, como son las de pérdida por masa, por calor transferido o pérdidas del ciclo termodinámico [7]. Inclusive, el análisis generado a la fecha, que se presenta para la aparición del fenómeno knock no considera la pérdida energética por vibraciones, pero si se ha dimensionalizado en otros rubros como las variaciones de la potencia cuando hay un cambio súbito de presión o el incremento de la temperatura dentro de cámara de combustión.

La instalación experimental actual que se usó en este trabajo no cuenta con la instrumentación ni los protocolos para la medición de la autoignición por medio de las vibraciones del motor, es por eso que este trabajo pretende iniciar el proceso de análisis de este fenómeno. Esto por medio de la señal de vibraciones detectadas en

el bloque del motor y de este modo inaugurar la línea de investigación que permita comparar las pérdidas energéticas que se manifiestan por medio de los distintos niveles de autoignición.

### 1.2.1 DETECCIÓN DE LA AUTOIGNICIÓN EN UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO

La autoignición se conoce como un fenómeno anormal de la combustión que se manifiesta principalmente cuando la mezcla de combustible alcanza altas temperaturas dentro de la cámara de combustión. Esto se describe en la literatura como puntos calientes de gas no quemado que se incendian a destiempo de la bujía, o también puede ocasionarse por zonas que se comprimen a altas presiones después de haber iniciado el encendido de la bujía pero se localizan en un espacio diferente al frente de llama [8].

Cuando este fenómeno se vuelve de mayor intensidad comienza a limitar la eficiencia térmica del proceso de combustión y se le conoce como *knock*, además trae consigo otros efectos que no son favorables [4]:

- Limita el rendimiento del motor,
- Incrementa los gases contaminantes emitidos,
- Limita el rendimiento de la aceleración,
- Es fuente de ruidos y vibraciones,
- Aumenta el consumo específico de combustible,
- Además, puede provocar daños físicos al motor como: erosión, fusión en paredes o anillos.

Debido a los problemas que representa el alto nivel de autoignición en el motor, existe una amplia rama de estudio que se dedica a la detección de este fenómeno. Se divide principalmente en dos categorías: método directo e indirecto. La diferencia básica se encuentra en que el método directo mide variables internas de la cámara de combustión, como puede ser la variación de presión interna de cámara. Por otro lado, los métodos indirectos se enfocan en medir variaciones consecuentes a la autoignición, como es el sonido o las vibraciones en el bloque del motor [9].

Para el caso de la presión interna en cámara, se busca analizar las señales que genera la presión durante el proceso de combustión, pues están directamente influenciadas por la autoignición. De esta manera, se analiza la frecuencia resonante en la presión interna y se filtra, de modo que puedan apreciarse las oscilaciones en la presión del cilindro y así parametrizar el nivel de autoignición [9]. En este método existen 3 principales desventajas, primeramente este tipo de infraestructura es bastante costosa y dado que va insertada en el interior del pistón, la exposición constante a altas temperaturas y presiones acorta drásticamente su tiempo de vida. La segunda se refiere a que la precisión en la medición varía drásticamente, cuando no existe autoignición la presión en el cilindro es homogénea, pero a medida que va incrementando esta comienza a variar en toda la cavidad y el sensor solo puede percibir lo que acontece a su alrededor pero no en el resto de la cámara. Por último, cuando se trata de un motor de grandes dimensiones, se debe considerar que se necesita un sensor para cada pistón, por lo que se incrementa drásticamente el costo y el tiempo de procesado de los datos [10].

Existen otros métodos indirectos basados en la vibración, estos usan principalmente acelerómetros sujetos al bloque del motor. Este tipo de sensores, al ser no intrusivos, disponen de una mayor durabilidad y por ende menor costo al no estar expuestos a condiciones extremas. Además, es posible detectar todos los pistones con un solo equipo, reduciendo también el volumen de la infraestructura y el tiempo de procesado [10].

Otra manera indirecta de detectar el nivel de autoignición, sobretodo los niveles elevados como el *knock*, es por medio de la temperatura de los gases de escape. Cuando existen niveles elevados de autoignición la temperatura tiende a descender. En comparación, hay ciertas ventajas sobre este método, por ejemplo, la señal de medición no se ve afectada por el ruido del motor de modo que la detección puede notarse claramente, es generalmente rápida y puede ser aplicada a muchos tipos de motores [11].

Cuando el proceso de combustión genera autoignición existen reacciones químicas que sobrepasan las cantidades normales en condiciones estables. Generalmente, estas son las que producen radicales en altas concentraciones y de esta manera pueden localizarse los puntos calientes antes de hacer contacto con el frente de llama. De esta manera, también puede detectarse el nivel de autoignición [10].

El nivel de autoignición que supera los 0.2 MPa puede verse reflejado también en el flujo de calor que se transfiere en el bloque del motor, por arriba de los 0.6 MPa los picos del flujo de calor pueden duplicarse en tamaño. De modo que, por esta otra vía, también es posible estandarizar un método para la detección de autoignición [12].

Con base en lo anterior, puede asumirse que conociendo los efectos que conlleva el fenómeno de la autoignición, es posible establecer una metodología de medición y estandarizar estos efectos para la detección por medio de observar las consecuencias indirectas en el motor. Este ha sido el caso de la detección de autoignición por medio de vibraciones.

En los últimos años ha habido un incremento en la investigación de esta rama debido al desarrollo del cómputo y a la creación de algoritmos que permiten el procesado de estas señales. Una de las aplicaciones más importantes de esta rama es también la detección de fallas, esta contribuye en gran magnitud al desarrollo los métodos de detección y control de las mismas.

### 1.2.2 PROGRESO EN LA DETECCIÓN DE LA AUTOIGNICIÓN POR MEDIO DEL ESPECTRO DE VIBRACIONES

La detección de autoignición por medio de vibraciones es un método indirecto que particularmente mide la señal en el bloque del motor o un punto cercano a este. Es importante recalcar que este tipo de medición es mucho más accesible económicamente que otros métodos, además con el ruido generado pueden detectarse otro tipo de fallas en el mismo funcionamiento del motor. Por otro lado, este método deberá ser aplicado a un tipo de motor en particular, como consecuencia puede cambiar la precisión y utilidad del mismo ya que para cada tipo de motor la metodología aplicada no siempre será satisfactoria [13].

A modo de comparación, un solo acelerómetro es suficiente para monitorizar la autoignición elevada o *knock* de un motor de 4 cilindros, mientras que si se tratara de un método directo sería necesario considerar un sensor para cada cilindro. Generalmente, la instalación de este tipo de sensores también suele ser más práctica que para otros métodos, dado que no es intrusivo, el sensor puede ir atornillado o adherido al bloque del motor [14].

Este tipo de sensores generalmente son piezoeléctricos y su uso en la industria es frecuente. La señal que generan es procesada por un micro-procesador para filtrar el ruido y otros fenómenos que pueden ir representados en la medición. Esto último puede dificultarse cuando la medición es para un motor robusto o que debe trabajar a altas velocidades, como son los motores de alta potencia [15] o bien cuando el nivel de autoignición es muy ligero [16]. En algunos de estos motores es bastante común encontrar las señales de determinados cilindros con mucho ruido, esto debido a que no es posible posicionar el sensor de tal manera que favorezca correctamente a todos los cilindros, esto principalmente porque la señal puede verse afectada por ruido de otras fuentes de vibración [17]. Este tipo de problemática genera la mejora continua de los métodos de filtrado para lograr niveles de detección más satisfactorios.

La detección por medio de vibraciones también ocupa un papel importante en la rama del diagnóstico de máquinas. Para el área de mecanismos existe un método de detección en el que se compara el estado natural del espectro de vibraciones, en caso de haber alteraciones o fallas este se ve perturbado, aunque en la mayoría de los casos detecta únicamente fallas generales [18]. En el campo de motores diésel, el correcto funcionamiento de válvulas es crucial para mantener la potencia del motor y prevenir desgaste. Actualmente, la línea de investigación procura detectar cada vez problemas más específicos como son: detectar el espacio de tolerancia de cierre de válvulas o fallas en el resorte de las válvulas, a su vez que comparar los métodos que lo realizan y determinar la exactitud que conlleva su uso [19]. Otros estudios se enfocan en variar el tipo de motor o la ubicación de los sensores que se usan para la detección, con ello mejora la detección de la falla en general aunque saber exactamente en qué válvula o pistón se localiza requiere un mejor desarrollo de filtrado[20].

Este tipo de mejoras hacen que en la producción en masa sea posible implementar máquinas con sistemas más autónomos y las posibles reparaciones sean fácilmente identificables en el momento oportuno. Del mismo modo, cuando hablamos del nivel de autoignición, la industria automotriz procura llevar una mejora continua pues permite alcanzar el grado máximo de eficiencia sin provocar los daños que conllevan los altos niveles de autoignición.

### 1.3 HIPÓTESIS

La energía liberada por vibraciones está relacionada directamente y proporcionalmente al nivel de autoignición en el motor, como consecuencia, dicha relación es significativa en términos de eficiencia térmica y su caracterización permite establecer estrategias para el máximo aprovechamiento de la liberación de energía durante el proceso de combustión.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente trabajo es caracterizar la liberación energética por vibraciones en relación a la intensidad de autoignición y el trabajo generado al interior del cilindro en un MEP, a través de la detección del espectro de vibraciones en la estructura externa de la cámara de combustión para establecer su relación con la eficiencia energética.

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Se enumeran a continuación los objetivos específicos necesarios para llevar a cabo el objetivo general:

1. Caracterizar las propiedades de vibración que posee el motor CFR, mediante la literatura, en sus diferentes modos de operación para determinar el tipo de sistema a utilizar.
2. Adaptar la instalación experimental mediante la implementación de un acelerómetro para la medición de las vibraciones del motor de acuerdo a los requerimientos encontrados en el equipo existente del laboratorio.
3. Caracterizar los dos modos de operación principales del motor (arrastre y combustión óptima) para evaluar el comportamiento del motor.
4. Realizar pruebas variando los modos de operación para determinar las vibraciones asociadas al fenómeno de autoignición.
5. Analizar las vibraciones comparando la ausencia y presencia del fenómeno de autoignición para determinar el cambio de energía involucrada en el proceso.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

*En este capítulo se presentan brevemente los conceptos teóricos que fundamentan esta investigación. Primeramente, se consideran conceptos básicos de el ciclo termodinámico más usado en automóviles o motores de encendido provocado, fenómenos anormales durante el proceso de combustión de los cuales la autoignición es uno de los temas pilares en el trabajo, seguidamente se presentará información sobre el tipo de motor usado para el banco experimental y por último la participación de los combustibles alternativos en la temática.*

## 2.1 CICLO TERMODINÁMICO: CICLO OTTO

Como fundamento de este trabajo, primeramente se encuentra el estudio de los motores de encendido provocado o motores tipo Otto. Este último nombre deriva Nicolaus Otto, quién desarrolla los motores de encendido por chispa y el proceso termodinámico que estos utilizan en 1876. Este tipo de motor consta de 4 tiempos: admisión, compresión, expansión y escape, en cada uno el pistón hace un movimiento en dirección contraria lo que eventualmente hace que se transmita energía al cigüeñal.

De acuerdo a la Figura 2.1, se describe el proceso a detalle iniciando con la carrera de **admisión**, la cuál comienza en el punto muerto superior (PMS) que corresponde al volumen mínimo en la cámara de combustión, mientras el pistón se desplaza hacia abajo la válvula de admisión (VA) permanece abierta y se introduce aire. Posteriormente, se detiene al llegar al punto muerto inferior (PMI) en el que la cavidad alcanza el volumen máximo para iniciar la carrera de **compresión** y volver a detenerse en el PMS. En este punto del proceso el total del combustible se encuentra dentro de la cámara si este fue liberado en el puerto de admisión.

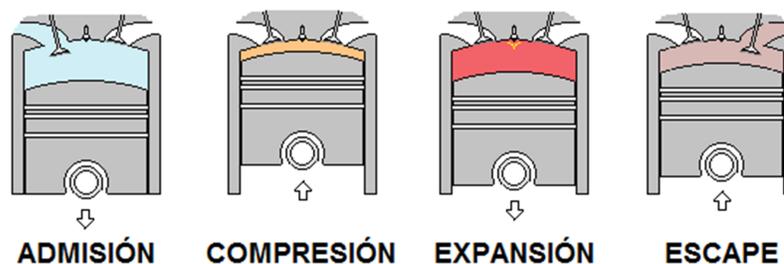


FIGURA 2.1: Proceso de 4 tiempos en el motor.

Desde el punto de vista termodinámico, en el proceso de compresión se incrementa la presión de la mezcla de combustible y justo antes de llegar al PMS se enciende la bujía para iniciar el proceso de combustión y se genere trabajo para iniciar la carrera de **expansión** en la que se incrementará presión y temperatura de manera súbita. A continuación se abre la válvula de escape (VE) e inicia la carrera

de **escape** en la que los gases remanentes salen de la cámara de combustión. Este proceso Otto inicialmente lo describe con 4 pistones, de esta manera pueden transmitir energía suficiente para las 4 etapas del ciclo que se llevan a cabo en dos vueltas del cigüeñal [4].

Este proceso puede ser visto de manera ideal desde el análisis termodinámico, para poder obtener un estándar de la eficiencia del ciclo de combustión y otros parámetros para su comparación. La Figura 2.2 representa las consideraciones del ciclo para tratarlo como un conjunto de procesos ideales.

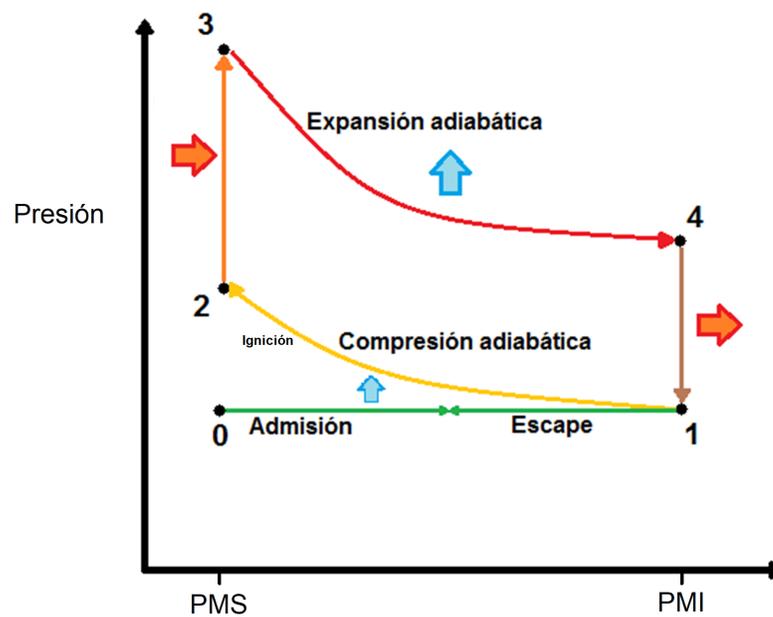


FIGURA 2.2: Diagrama presión-volumen para el análisis de un ciclo ideal.

Iniciando en el proceso de compresión (1-2) existe un ascenso rápido de presión que descrito idealmente sería adiabático y reversible (isentrópico). De modo que, justo antes del PMS se inicia el proceso de combustión (2-3) con el encendido de la mezcla, que se toma como un proceso adiabático a volumen constante. La expansión nuevamente sería un proceso isentrópico (3-4) y el escape adiabático (4-1-0) al igual que la admisión (0-1) sin cambios de presión. Se debe tener en cuenta que estos procesos ideales descartan pérdidas energéticas, para aproximar un poco más el

proceso a la realidad se toma la Figura 2.3. En contraste, tomar el proceso como ideal sirve para determinar indicadores del rendimiento del motor durante el proceso de combustión.

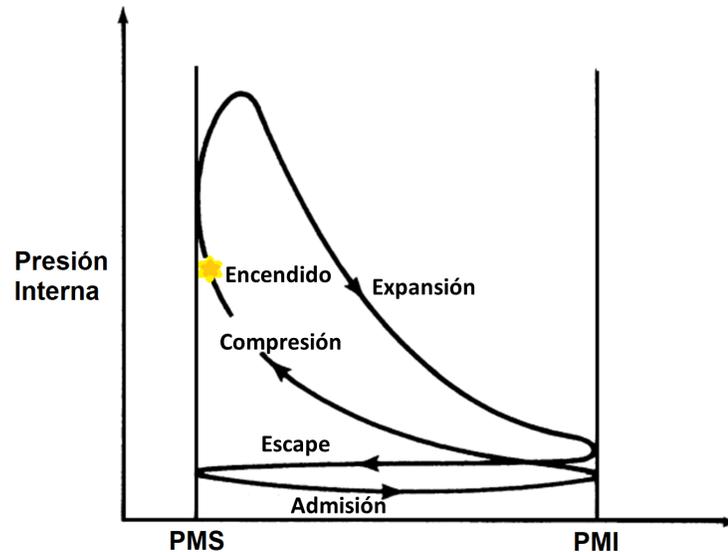


FIGURA 2.3: Diagrama presión-volumen para el análisis de un ciclo real.

Una de las características más importantes en el motor de combustión y que es determinante en el ciclo, es la relación de compresión. Esta es un índice que describe la relación que existe entre el volumen máximo y mínimo de la cámara de combustión, o bien la capacidad volumétrica entre el PMI y el PMS. Esta propiedad es determinante cuando se trata de evaluar la potencia en un motor y esto se debe al trabajo que puede generar en función del combustible. De modo que mientras más incrementa la relación de compresión, mayor es la potencia generada, que se ve limitada por el nivel de autoignición. Para los motores de encendido provocado las relaciones de compresión varían de 8 a 12 y para los motores de ignición por compresión este valor incrementa de 14 a 22 [4].

## 2.2 FENÓMENOS ANORMALES EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Existen dos principales fenómenos anormales durante la combustión, los altos niveles de autoignición y la ignición superficial. En términos generales, dependiendo de la intensidad pueden ocasionar daños internos al motor o disminuir la potencia entregada.

En la literatura, los altos niveles de autoignición se conocen por el término *knock* (en idioma inglés), cuando este fenómeno se hace presente el motor genera un ruido particular y detectable al oído humano. La aparición de este fenómeno se atribuye principalmente a las zonas en condiciones propicias, ya sea en elevada temperatura o presión, que se encienden fuera del rango del frente de llama. Por otro lado, el encendido superficial se lleva a cabo por las mismas causas pero se localiza en la superficie del cilindro o algún componente y puede ocurrir en cualquier momento que se encuentre la mezcla en la cámara, antes o después de la ignición [21].

### 2.2.1 AUTOIGNICIÓN

La autoignición esta presente siempre durante el proceso de combustión, sin embargo, los niveles elevados o *knock* producen efectos no deseados. Algunos autores atribuyen esto particularmente al gas remanente de combustión, la presencia de este para ciclos posteriores conlleva un incremento de la temperatura, lo que provoca ignición espontánea de la mezcla [8]. Considerando el comportamiento de la presión interna de la cámara se generan picos a lo largo del proceso de combustión tal como se muestra en la Figura 2.4.

La premisa anterior indica que la autoignición está principalmente administrada por la cinética química de la mezcla. Al encontrarse el gas remanente aún en la

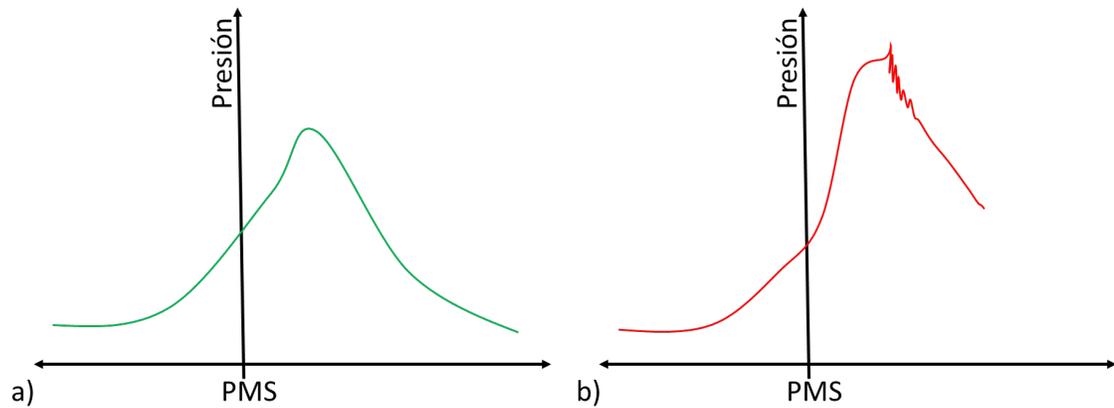


FIGURA 2.4: Gráfica representativa de presión interna en cámara: a) proceso de combustión normal, b) proceso de combustión anormal con alto nivel de autoignición.

cámara, incrementará la temperatura y presión en la mezcla durante la carrera de compresión, en caso de que las propiedades sean propicias habrá autoignición [8].

Algunos autores toman como consecuencia del alto nivel de autoignición cambios en la temperatura de las paredes de la cámara. Esto a su vez genera puntos calientes que a su vez inducen a la pre-ignición, cuando esto se genera el ciclo posterior se encontrará con niveles aún más severos de autoignición y por ende de pre-ignición. Las consecuencias en este punto son altamente dañinas para el motor, debido a que en esas zonas calientes las paredes o válvulas pueden comenzar a fundirse generando agujeros y con esto una falla general [22]. Cuando este fenómeno se vuelve recurrente pasa a ser incontrolable y el motor permanece en constantes explosiones de encendido incluso con el sistema de ignición apagado.

Por otro lado, una manera de evitar esta serie de eventos es regulando el ángulo de encendido, retrasando la chispa. Al tener niveles de autoignición elevados pero que pueden ser controlados con el retraso del encendido se le conoce como *spark knock* [4].

### 2.2.2 DETECCIÓN DE AUTOIGNICIÓN

Existen muchos tipos de métodos de detección de autoignición elevada o *knock* y a pesar del desarrollo tecnológico en esta dirección la literatura indica que la manera más eficaz de detección es un oído humano bien entrenado. Sin embargo, debido a la necesidad de automatizar este proceso, han surgido varios esfuerzos como la medición de presión dentro de cámara, la intensidad de vibración en el bloque del motor, temperatura de los gases de escape, análisis de especies, entre otros, más este trabajo estará enfocado únicamente a la detección por medio de vibraciones en el bloque ya que es una de las mejores manera de detectar autoignición de manera automatizada.

Este tipo de detección generalmente usa método no paramétrico, ya que dependiendo del nivel de la vibración en el motor se debe realizar una escala de acuerdo a la intensidad de autoignición detectada en correlación con otros métodos. Cuando ocurre la autoignición se generan ondas de presión dentro de la cámara y esas mismas viajan a través de las paredes en forma de vibraciones para posteriormente convertirse en sonido. Las frecuencias de la señal dependen primordialmente de el tamaño y forma de la cámara, la resonancia y los puntos de operación del motor [10].

Los sensores de detección por vibración poseen muchas ventajas en comparación con otros métodos, inicialmente son de un bajo costo y se requieren menor número de unidades, pues una sola puede monitorizar entre 3 y 4 pistones. Es por ello, que este método es el más común en la industria automotriz.

### 2.2.3 RESISTENCIA A LA AUTOIGNICIÓN

La autoignición frecuentemente esta asociada al combustible en uso y al diseño del motor. Esto por dos factores principales: el combustible se rige mediante el

número de octano, que se explicará en la siguiente sección, y el diseño del motor porque supone las condiciones a las que será sometido el combustible.

Primeramente, el combustible comercial actual cuenta con una clasificación que determina la resistencia a la autoignición, el número de octano, mientras más alto sea el número más resistente será. Esto es característico particularmente por los procesos químicos que regulan la combustión particularmente de los hidrocarburos a diferentes condiciones de operación, como son la temperatura y presión.

Estas condiciones deben permanecer durante suficiente tiempo en el mismo punto para poder encender la mezcla, a esta propiedad se le conoce como retraso de encendido o tiempo de inducción ( $\tau$ ) [22]. Para determinar esta propiedad se realizan pruebas en máquinas de compresión rápida para determinar las constantes que pertenecen al combustible de acuerdo a la Ecuación (2.1).

$$\tau = Ap^{-n} \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.1)$$

Esta expresión define el tiempo de inducción para el que A, B y n son constantes propias de cada combustible, mientras que p y T son las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentra la mezcla. Aunque esta expresión pretende ser muy práctica, también tiene una fuerte dependencia de la composición de combustible y existen expresiones para calcular el tiempo por medio de las concentraciones molares de la mezcla [22].

En el caso de los combustibles derivados de hidrocarburos, se debe considerar considerar la composición de cada uno. En el caso de la mezcla de crudo esta compuesta principalmente por carbón e hidrógeno principalmente, alrededor de un 85 % y 12 % respectivamente, además de otros componentes en proporciones menores. Para obtener gasolina, el crudo pasa por un proceso para descomponer las cadenas carbonatadas y separarlas dejando compuestos de menor peso molecular, como son los solventes o las gasolinas, esto ya sea por medio de craqueo o destilación [6].

A pesar de este proceso, la gasolina típica no es una sustancia pura, sino una mezcla de varios componentes que con distintos pesos moleculares que poseen también distintos puntos de ebullición directamente proporcionales al peso molecular. Esto es muy deseable en un combustible, ya que distintas temperaturas de evaporación harán que el motor pueda funcionar en distintas condiciones que generalmente están cambiando en el puerto de admisión. Si el combustible se evapora muy rápido a una baja temperatura, el motor puede sufrir ciertos problemas como el bloqueo por vapor o bien que el vapor del combustible sature la entrada de aire en el puerto de admisión. Por el contrario, si tarda demasiado en evaporarse, puede condensarse en las paredes o salir en los gases de escape sin quemarse. Por ello, lo ideal es que la mayoría del combustible se vaporice durante la carrera de compresión y una menor proporción durante la admisión [6].

La tendencia del nivel de autoignición también se encuentra estrechamente relacionada a la estructura molecular de acuerdo a los siguiente componentes [4]:

- **Parafinas:** en general, se incrementa la cadena carbonatada por lo que incrementa el peso molecular y a la vez la tendencia a la autoignición.
- **Olefinas:** cuentan con un doble enlace que disminuye la intensidad de autoignición notablemente, salvo ciertas excepciones de cadenas.
- **Neptanos:** las series tiene una tendencia ligeramente menor para producir autoignición.
- **Aromáticos:** aquellos de doble o triple enlace reducen notablemente la tendencia de autoignición.

Por ello que la correcta proporción de componentes volátiles en un combustible tendrá una gran influencia durante el ingreso a la cámara, el proceso de compresión y el proceso de combustión. Idealmente la mezcla se encontrará homogénea (en una concentración uniforme), provocando que el frente de llama se mantenga. Cuando esto no sucede existe la autoignición no deseada pues la temperatura y presión

en esos puntos contribuyen a que en ciertos puntos la mezcla se encienda. Este fenómeno lidera la propagación de olas de detonación, lo cual puede causar la ignición espontánea de toda la mezcla y como consecuencia el desprendimiento de la pared en algún punto de la cámara [8].

La investigación actual en este rubro se ha enfocado en niveles de autoignición extremadamente altos, el término en inglés es *super knock*. Con el uso de aditivos aromáticos a la mezcla, como es el etanol, se ha observado una reducción del *super knock*, siempre que la proporción no rebase el 15% en mezcla de gasolina, de lo contrario incrementa drásticamente. Se asume que superar este límite incrementa drásticamente la formación hollín lo que aumenta la formación de puntos calientes con el gas residual en ciclos posteriores [23].

El otro factor importante a considerar que afectan los niveles de autoignición es el diseño del motor, ya que esto manipula directamente las variaciones de presión y temperatura que puedan presentarse. Si se considera la presión de inicio del ciclo mientras más alta sea, más será la tendencia a la autoignición. Es por ello que los motores turbocargados tienen una tendencia directa a presentar *super knock*.

Cuando se considera las propiedades de presión y temperatura, se debe recordar que están estrechamente relacionadas una a otra. Sin embargo, es notable durante el proceso de combustión que la presión tiene una mayor incidencia en la autoignición, si únicamente se varía el nivel de presión alcanzado o bien si se cambia la relación de compresión, se genera siempre mayor nivel de autoignición que cuando se varía la temperatura. Esto se justifica debido a que en ambos casos la carga energética impresa en la mezcla irá en aumento conforme aumenta la presión inicial o la diferencia de presión a la que es sometida principalmente porque aumenta la densidad del combustible confinado en el espacio [23]. La relación se ve representada de acuerdo a la Figura 2.5 (adaptada de Wang et al. [23]) que describe los diferentes niveles de autoignición elevada que hay en el motor de combustión.

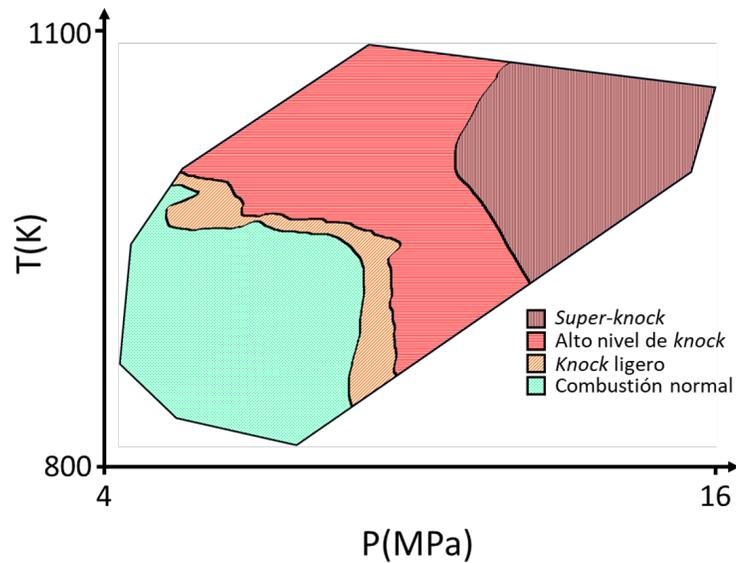


FIGURA 2.5: Diagrama presión-temperatura zonas de intensidad de autoignición (adaptada de Wang et al. [23]).

## 2.3 EL MOTOR DE RELACIÓN DE COMPRESIÓN VARIABLE

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, los distintos tipos de combustibles varían bastante en la tendencia a producir autoignición. Para tener una comparación directa, en 1930, la *Cooperative Fuel Research Committee* (CFR, por su sigla en inglés) define una escala que determina el número de octano de un combustible (ON). Esta escala se compone de hacer una comparación con un combustible compuesto por n-heptano/iso-octano, este combustible se usa en un motor a condiciones estándar. La combinación de este combustible compuesto hace que se pueda tener una escala de 100 (únicamente iso-octano), que es prácticamente nulos niveles de autoignición. Conforme la mezcla varía se obtienen números de octano menores y con ello se clasifican los combustibles comerciales [8].

Durante esta categorización se debe obtener primero la escala con el combustible primario de referencia ya mencionado, posteriormente elegir el tipo de prueba

para determinar el tipo de número de octano necesitado. Asociados a los automóviles están el número de motor y el de investigación (MON y RON, respectivamente por sus siglas en inglés) [6]. A continuación se detallan las diferencias en las condiciones de la prueba para ambos números en la Tabla 2.1 de acuerdo a las normas ASTM D-2699 y ASTM D2700.

TABLA 2.1: Condiciones de operación para determinar números de octano.

Parámetro	RON	MON
Temperatura de aire de admisión	52 °C	38 °C
Presión de aire de admisión	atm.	atm.
Temperatura del refrigerante	100 °C	100 °C
Velocidad del motor	600 rpm	900 rpm
Ángulo de chispa	-13 °PMS	-14–26 °PMS
Relación de compresión	4–18	4–18

Esta escala es útil para comprender la relación que el combustible tiene con la autoignición durante el proceso de combustión, se encuentra muy estrechamente relacionado con el que se causa por gases remanentes. Sin embargo, cuando se habla de la preignición y del *super knock* no necesariamente se encuentra una relación directa con los números RON y MON. Por ejemplo, el etanol tiene una tendencia relativamente alta a la preignición a pesar de que sus números de octano son bastante altos, sin embargo ya se ha mencionado el efecto favorable cuando se trata del *super knock* cuando se añade como aditivo en proporciones bajas [23]. De modo que aún hay un amplio espectro desconocido por estudiar con respecto a la autoignición en general.

## 2.4 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

En la actualidad, las políticas en general sobre generación de energía se han desarrollado para ampliar el esquema del uso del combustible alternativo. Debido

a que el petróleo se ha vuelto escaso y se ha demostrado altos niveles de  $CO_2$  que generan los hidrocarburos, se promueve usar otro tipo de combustibles e incrementar la eficiencia en consumo, para producir menos emisiones.

Como precedente de alternativas, casi un tercio de la población ha estado usando alcohol como el principal combustible vehicular, ya que es demasiado costoso transportar el combustible procedente de petróleo a esas zonas. Adicionalmente, han existido esfuerzos realizados desde 1950 para abastecer este tipo de zonas con combustibles alternativos y disminuir la cantidad de emisiones generadas y aunque han habido muchos avances en estos últimos 70 años, no es posible ignorar el crecimiento desmedido a la par que ha tenido el parque vehicular.

Desde esta perspectiva, es importante considerar el desarrollo y la investigación enfocada en combustibles alternativos que puedan ser implementados en motores de combustión interna masivamente. Actualmente, el grado de investigación en ese ámbito tiende a usar bancos de pruebas adaptados del combustible comercial hacia el alternativo, esto quiere decir que, aunque exista basta información, aún no se ha desarrollado de manera óptima la tecnología necesaria para el combustible alternativo en particular, por lo tanto, son bastante costosos en el momento presente.

Este trabajo en particular, compara uno de los más usados a la fecha que es el etanol (alcohol etílico), que además es uno de los más prometedores pues ha sido usado como aditivo desde 1990. Algunas de las ventajas principales de los alcoholes es que pueden ser obtenidos de diversas fuentes, tanto naturales como manufacturadas, el número de octano es superior a 100 por lo tanto, este tipo de combustible permite diseños con una mayor relación de compresión, en comparación con la gasolina genera menos emisiones de manera generalizada, posee bajos niveles de sulfuro y debido a sus propiedades el proceso de admisión puede ser más frío por lo que incrementa la eficiencia volumétrica. De manera contrastante, el etanol tiene otras propiedades negativas, por ejemplo, necesita cerca del doble de combustible para generar la misma potencia que la gasolina debido principalmente al poder calorífico,

la emisión de compuestos aldehídos es mucho mayor que con la gasolina, también es mucho más corrosivo que la gasolina en muchos metales y plásticos por lo que se deben rediseñar los sistemas del motor, para climas fríos el encendido y la ignición se vuelve difícil, la flama generada es casi invisible, la presión de vapor es mucho menor y por lo tanto más peligroso de transportar, las bajas temperaturas de flama hacen que el catalizador no opere de manera óptima y otros problemas que generan las propiedades en el motor pueden hacer este combustible menos deseable para una sustitución completa [6]. Nuevamente este tipo de detalles son problemáticas que pueden verse solucionadas cuando hay un rediseño de maquinaria y sistemas para este tipo de combustible en particular.

En términos particulares, el etanol ha sido usado principalmente en economías donde hay grandes posibilidades para su uso, por ejemplo, Brasil desde los años 90 tiene alrededor de 4.5 millones de vehículos operados con un 93 % de etanol o Estados Unidos que lo ha usado como aditivo hay 10 % como **gasohol**. En la actualidad el etanol proviene principalmente de fermentación de granos y azúcar, en Estados Unidos principalmente del maíz. En este último punto vale la pena considerar que si el combustible proviene de una fuente de alimentos esto genera una competencia demanda y ambos mercados incrementan en costo, y en el mismo sentido se debe garantizar que todo el proceso energético de la obtención sea redituable considerando el producto final como combustible [6].

Además de los alcoholes existen otros combustibles alternativos importantes como son el hidrógeno, gas natural, gas butano, gasolina re-formulada, solución de carbón, entre otros. Cada uno de ellos tienen alguna desventaja que no los hace competir en la actualidad con la gasolina, como el hidrógeno que su principal problema es la generación limpia y el almacenaje o el gas natural que su mezcla es muy inconsistente y el estado gaseoso le hace tener una baja eficiencia volumétrica, en este punto, todos los combustibles alternativos se consideran a penas un 5 % de toda la demanda energética para el transporte [24]. Es por esto que la investigación debe desarrollarse en pro del uso de los combustibles alternativos en todo el espectro.

## 2.5 SEÑALES ONDULATORIAS Y EL ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

En la literatura, cualquier tipo de fenómeno puede representarse por medio de señales, este sería la definición de funcionamiento de cualquier sensor en la actualidad. Dependiendo del tipo de fenómeno, la señal eléctrica representa un patrón particular y esta puede ser continua o discreta en el tiempo.

En el caso de esta investigación, se toma una muestra con un número finito de datos, por lo que la variable se considera discreta en el tiempo. Debido a esto, los métodos para poder analizarla serán enfocados en este tipo de variables que también son señales ondulatorias pues poseen un periodo a través del tiempo.

Este tipo de señales son más fáciles de analizar si se consideran como un conjunto de frecuencias a través del tiempo, para esto se reconocen las frecuencias armónicas y se componen de una fundamental además de sus múltiplos conocidas también como armónicas secundarias [25]. Esto porque siempre existirá una frecuencia que describa mejor el fenómeno, en el caso de un motor siempre será la frecuencia relacionada a la velocidad que posee.

Por ejemplo, la frecuencia fundamental en la nota de un instrumento es fácil de identificar, pues dependiendo del número de frecuencia existe su equivalente a una nota musical sin embargo, los múltiplos de la frecuencia fundamental que se conocen como armónicas secundarias le otorgan definición al sonido que aún con la misma nota permite diferenciar un instrumento de otro. De manera análoga sucede el mismo fenómeno en un motor, la frecuencia fundamental es la misma velocidad a la que se opera el motor, sin embargo su valor y armónicas secundarias le darán una particularidad que puede ser definida como la **identidad vibratoria** [26].

### 2.5.1 TRANSFORMADA DE FOURIER

El método de transformada parte de la necesidad de poder representar numerosas señales en combinaciones lineales de señales básicas, para el caso de este trabajo particular la detección de autoingnición [27]. En el caso de esta metodología fue usada la serie para transformadas discretas aplicable a sistemas lineales invariantes en el tiempo, aunque en este caso la señal no se comporta igual con el pasar del tiempo, el experimento posee condiciones propicias para idealizarlo como una señal invariante y es por ello que este método es apto para el análisis. Obviando el método para aplicar la transformada se pueden determinar varios elementos de la misma, estos son representativos de la señal y los dos principales pertinentes para este estudio fueron los siguientes: la representación de magnitud-fase, a continuación se muestran las correspondientes a una transformada continua y discreta en el tiempo.

$$X(jw) = |X(jw)| e^{j\angle X(jw)} \quad (2.2)$$

$$X(e^{jw}) = |X(e^{jw})| e^{j\angle X(e^{jw})} \quad (2.3)$$

Esto esta representado así, puesto que cuando se piensa en la transformada se puede decir que es la descomposición de la señal  $x(t)$  y mostrada de esta manera es la suma de exponenciales complejas a diferentes frecuencias. Por otro lado, la magnitud al cuadrado de la transformada puede interpretarse como la densidad energética de la señal en el tiempo  $x(t)$ , mientras que la magnitud sola se refiere al contenido básico de la señal para determinada frecuencia [28].

## 2.5.1.1 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Este método considera primero la Transformada Discreta de Fourier, esto por el tipo de datos con los que se cuentan en este experimento. Primeramente, considera una secuencia de datos finita entendida como muestras separadas igualmente en el tiempo a cierta frecuencia conocida. De este modo, la transformada de esta secuencia se puede expresar como:

$$X(e^{j2\pi f\Delta}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta)e^{-j2\pi fn\Delta} \quad (2.4)$$

Esto se ve expresado aún con una frecuencia continua, pero si se obtiene para la evaluación a ciertas frecuencias, de modo que queda expresado como:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta)e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (2.5)$$

Esta expresión se puede ver como la Transformada expresada en el dominio de frecuencias. Para esta, también se considera una inversa, la cual se expresa como:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (2.6)$$

Para el método de transformada rápida, solo se necesita lo que se conoce en inglés como Radix 2 FFT, se presenta a continuación de manera análoga a lo que sería un cambio de variable. Esto no cambia el método en sí sino la forma y rapidez con la que converge, de manera que agiliza tanto el método que ahora se le denomina como procesamiento en tiempo real.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad \because W_N = e^{-j(\frac{2\pi}{N})} \quad (2.7)$$

En la cual se describe esa nueva definición periódica con un periodo N tanto

---

en  $k$  como en  $n$ . Por lo tanto este método aprovecha la periodicidad y simetría de esta nueva función. Por lo tanto, el número de operaciones pasa de incrementar de manera exponencial a logarítmica base 2, por ejemplo: si  $N = 1024$  el número se reduce en un factor de 100 [29].

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

*A lo largo de este capítulo se describe la instalación experimental usada para este trabajo, además de los elementos añadidos de manera temporal. Así también, se describe la metodología usada para realizar la toma de datos y la validación para las modificaciones efectuadas en la misma, adicionalmente se describe brevemente el tratamiento de datos que fue aplicado en el proceso.*

## 3.1 INSTRUMENTOS Y MATERIALES

En esta sección se describe a profundidad el tipo de motor utilizado para la experimentación y los modos de operación que se pueden usar durante las mismas. Además se describen los acelerómetros usados en la instalación para medir la intensidad de autoignición representada por vibraciones y con esto el comportamiento vibratorio esperado del motor.

### 3.1.1 MOTOR TIPO CFR

Para llevar a cabo las pruebas se utilizó un banco que posee un motor monocilíndrico conocido como tipo CFR (*Cooperative Fuel Research Committee*, por sus siglas en inglés). Este motor tiene como principal característica ser de encendido provocado y de relación de compresión variable, marca Waukesha modelo F1/F2.

Este tipo de motor en particular es un banco dedicado únicamente a fines de investigación, aunque originalmente es diseñado para poder medir el número de octano de los combustibles, la instalación con la que cuenta el laboratorio principalmente se dedica a la línea de detección de autoignición por presión interna en cámara. Dentro de sus principales funciones, la instalación tiene control sobre muchas variables a diferencia de un motor tradicional, como son: la temperatura de aire de admisión, retraso de chispa, la temperatura del bloque del motor, la relación de compresión que va de 4 a 16, tiempo de apertura del inyector en puerto, variación de índice aire-combustible, velocidad de operación y tiempo de operación. Las características principales se describen en la Tabla 3.1.

El sistema de aire de admisión esta compuesto por un filtro y un remanso que posee un sistema de control con una resistencia de 2,000 W colocada antes de la cámara de admisión en donde se encuentra el inyector. Puede encontrarse información más detallada en los trabajos de Gómez [30] y Rubio [31].

TABLA 3.1: Características generales del motor CFR.

Propiedad	Valores
Relación de compresión	4–16
Diámetro (cm)	8.236
Carrera de pistón	11.43
Longitud de la biela (cm)	25.4
Altura (cm)	20.741
Desplazamiento ( $cm^3$ )	611.729

Esta instalación puede calcular por defecto la masa de combustible requerida, sin embargo para corroborar el valor requerido se usa un analizador de gases externo marca MAHA modelo MET 6.3. Este dispositivo se usó para medir el valor de lambda ( $\lambda$ ) que se refiere a la relación de aire-combustible calculada con el oxígeno detectado en los gases de escape. De esta manera se retro-alimenta el sistema para poder garantizar la mezcla en valor estequiométrico. La Tabla 3.2 muestra las especificaciones más importantes.

### 3.1.2 MODOS DE OPERACIÓN EN EL MOTOR

Este tipo de motor opera de una manera distinta a los motores convencionales de uso comercial, ya que es un modelo de pruebas, este motor no posee ningún tipo de carga o peso que limite la potencia. Dicho de otro modo, el motor no entrega trabajo, por el contrario un motor eléctrico está acoplado al cigüeñal, lo que garantiza que el pueda tener siempre la misma velocidad.

Adicionalmente, la instalación del motor está adaptada para funcionar por intervalos, de modo que el motor posee un lapso en el que la chispa se enciende y permanece en combustión por un tiempo finito, para posteriormente permanecer en movimiento pero sin combustible ni chispa, a este último modo se le conoce como

TABLA 3.2: Especificaciones del analizador de gases.

Característica	Rango	Valores
HC (hexano)	0-2000 ppm	$\pm 4$ ppm abs. - 3% rel.
	0-4000 ppm	$\pm 8$ ppm abs. - 3% rel.
HC (propano)	4001-10000 ppm	$\pm 5$ % rel.
	10001-30000 ppm	$\pm 10$ % rel.
CO	0.00-10.00 vol %	$\pm 0.02$ % abs. - $\pm 3$ % rel.
	10.00-15.00 vol %	$\pm 5$ % rel.
CO <sub>2</sub>	0.00-16.00 vol %	$\pm 0.03$ % abs. - $\pm 3$ % rel.
	16.01-20.00 vol %	$\pm 5$ % rel.
O <sub>2</sub>	0.00-25.00 vol %	$\pm 0.03$ % abs. - $\pm 1$ % rel.
Temperatura	0-150 °C	
Velocidad	400-8000 rpm	

arrastre. Durante las pruebas, estos intervalos se organizan en pares de arrastre y combustión, de modo que para referirse a dos intervalos, uno de arrastre y otro de combustión juntos, se le asigna el nombre de **periodo de combustión**. Para ambos intervalos, la velocidad del motor es de 900 rpm según la norma ASTM D2700 [32], el sistema se describe con amplio detalle en el trabajo de Corral et al. [33].

De acuerdo a las pruebas realizadas para este trabajo, un periodo de combustión se constituye de 40 segundos de combustión y 20 seg. de arrastre aproximadamente. Así mismo, cada una de las pruebas realizadas consta de 11 periodos de combustión como muestra para cada elemento de la matriz experimental, en otro segmento se detallará con más profundidad. En la matriz experimental se podrán observar los 2 tipos principales de operación y un tercero: combustión anormal con distintos niveles de autoignición.

### 3.1.3 INDUCTORES E INSTALACIÓN

Para las pruebas realizadas se utilizaron 3 acelerómetros uniaxiales de la marca PCB PIEZOTRONICS con número de modelo 352C22 con una resolución de  $0.04 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$  para un rango de frecuencia de hasta  $10,000 \text{ Hz}$  y un rango de medida de  $\pm 4,900 \text{ m/s}^2 \text{ pk}$ , posee una carcasa de aluminio y un peso de  $0.5 \text{ gr.}$  La Tabla 3.3 describe información técnica del sensor, puede encontrarse información más detallada en el Apéndice A.

TABLA 3.3: Especificaciones del acelerómetro.

Característica	Unidades	Valor
Sensibilidad ( $\pm 15 \%$ )	$\text{mV}/(\text{m/s}^2)$	1.0
Rango de medida	$\text{m/s}^2 \text{ pk}$	$\pm 4,900$
Rango frec. ( $\pm 5 \%$ )	Hz	1.0 – 10,000
Rango frec. ( $\pm 10 \%$ )	Hz	0.7 – 13,000
Rango frec. ( $\pm 3\text{dB}$ )	Hz	0.3 – 20,000
Frecuencia de resonancia	kHz	$\geq 50$
Resolución de banda	$\text{m/s}^2 \text{ rms}$	0.04
Rango Temp.	$^{\circ}\text{C}$	-54 – +121
Límite de Shock	$\text{m/s}^2 \text{ pk}$	$\pm 98,000$
Voltaje de Bias	VDC	7 – 12
Peso	gr.	0.5

El montaje de los acelerómetros se situaron en orientación a cada una de las dimensiones espaciales\* directamente en la culata del motor. Para esto, se llevo a cabo un proceso de remoción de pintura y limpieza para adherir la carcasa del sensor por medio de adhesivo de Cianoacrilato. La posición de los sensores se acopló a la estructura equivalente a la culata del pistón.

Para procesar la señal emitida por los acelerómetros, se utilizó un analizador Photon+ Synamic Signal Analyzer de marca Bruel&Kjær®), el cual usa el software

RT Pro™ que permite procesar la señal en tiempo real. El analizador cuenta con una capacidad de muestreo sobredimensionada al sensor, de hasta 84 kHz en 42 segmentos, además el rango dinámico es de 115 dBFS y cuenta con 32-bits de procesamiento de señal. Para fines prácticos, los datos recolectados fueron importados en formato ASCII para un análisis posterior.

### 3.1.4 ANÁLISIS PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO VIBRATORIO

Todos los motores de combustión interna poseen cierto nivel de vibración de manera normal, cuando existen fenómenos anormales como la autoignición los niveles incrementan aún más. Para poder determinar el comportamiento 'natural' del motor se realizó un análisis del comportamiento vibratorio.

Este tipo de análisis es particular para cada motor ya que la instalación y los tiempos de operación cambian drásticamente de motor a motor. El motor de la instalación es monocilíndrico y mantiene una velocidad constante, por lo que la componente más importante, o bien, la armónica fundamental es la referente a la velocidad de 900 rpm que equivale a una frecuencia de 15 Hz. Adicionalmente, se estudian las armónicas consecuentes que equivalen a 30, 45 y 60 Hz, para poder establecer la identidad vibratoria del motor. Esta metodología está basada en el trabajo de Manhertz [34].

En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de la señal 'cruda' encontrada en cualquier muestra, se muestra un conglomerado de señales ondulatorias en las zonas de tipo combustión, mientras que señales cercanas al origen cuando el motor se encuentra en arrastre. Este tipo de señal puede observarse en los 3 ejes coordenados, adicionalmente puede observarse la perturbación más importante en la Figura 3.2. En esta figura se ve representada la duración de 1 segundo durante el modo de combustión, dado que es un motor de 4 tiempos, frecuencia representativa es de 15 Hz sin embargo, la frecuencia de combustión es de 7.5 Hz debido a que acontecen

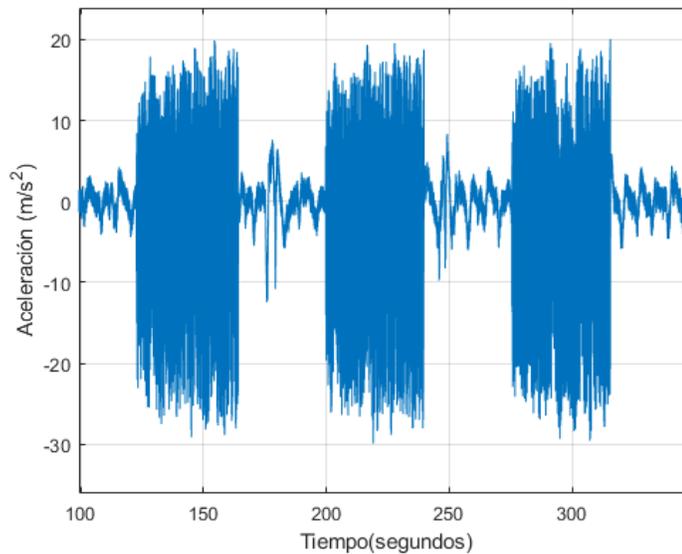


FIGURA 3.1: Historia de tiempo para la componente Y, muestra de tipos de operación combustión-arrastre.

2 vueltas al cigüeñal por cada ciclo de combustión o bien, por cada que la mezcla se enciende. Es por esto que en la figura se observan 7 picos en un segundo, se encuentran alrededor de 7.5 ciclos por segundo durante el modo de combustión.

## 3.2 MATRIZ Y TIPO EXPERIMENTAL

En este apartado se detallarán las condiciones propuestas para las pruebas realizadas. De manera general, se describen los 3 combustibles usados, Gasolina de 87 octanos, Etanol e Iso-Octano como combustible de referencia. Además de las variaciones para las condiciones del motor, como son la relación de compresión y temperatura de aire de admisión. Adicionalmente se detallarán las dos metodologías establecidas para la construcción de la identidad vibratoria y la detección del nivel de autoignición en el motor, tal como se observa en la Figura 3.3 que representa el esquema de las dos metodologías a seguir.

Para el primer caso, la identidad vibratoria, aunque la metodología es corta

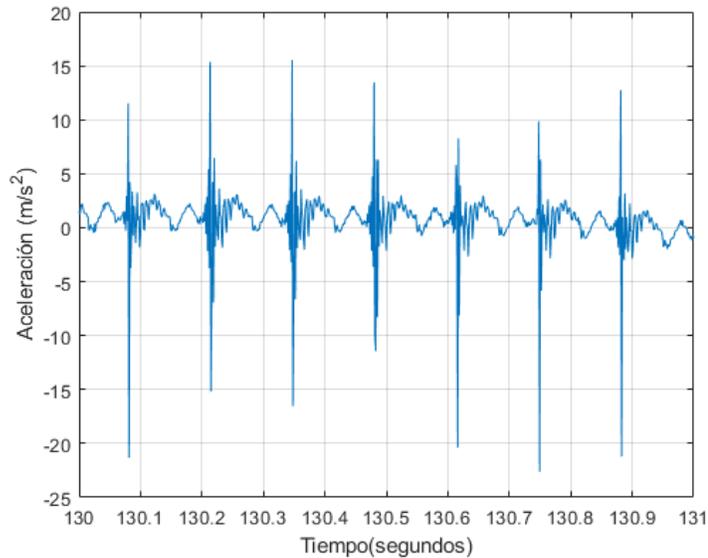


FIGURA 3.2: Detalle para historia de tiempo en la componente Y.

se consideró como principal premisa garantizar la repetibilidad de las pruebas y ampliarlas lo suficiente para que la variación estadística sea despreciable. Por ello, la cantidad de información que fue analizada es una cantidad robusta garantizando la certeza en los valores que definen la identidad del motor.

La segunda metodología se enfoca iniciar el método de detección por vibraciones en este banco experimental, además de considerar el fenómeno de autoignición como variable ciclo a ciclo, de modo que en este caso particular los datos se recopilan con una alta resolución de muestreo pero solo en la cantidad suficiente para respetar la estadística de la variación ciclo a ciclo.

### 3.2.1 CONDICIONES EXPERIMENTALES

Este trabajo se ve delimitado por las variables que son determinadas por el mismo banco experimental, en este caso el combustible usado fue puro para gasolina 87 octanos de nombre comercial PEMEX Magna, Etanol e Iso-octano, a cada uno de ellos les corresponde un grupo de relación de compresión distinta. Adicionalmente

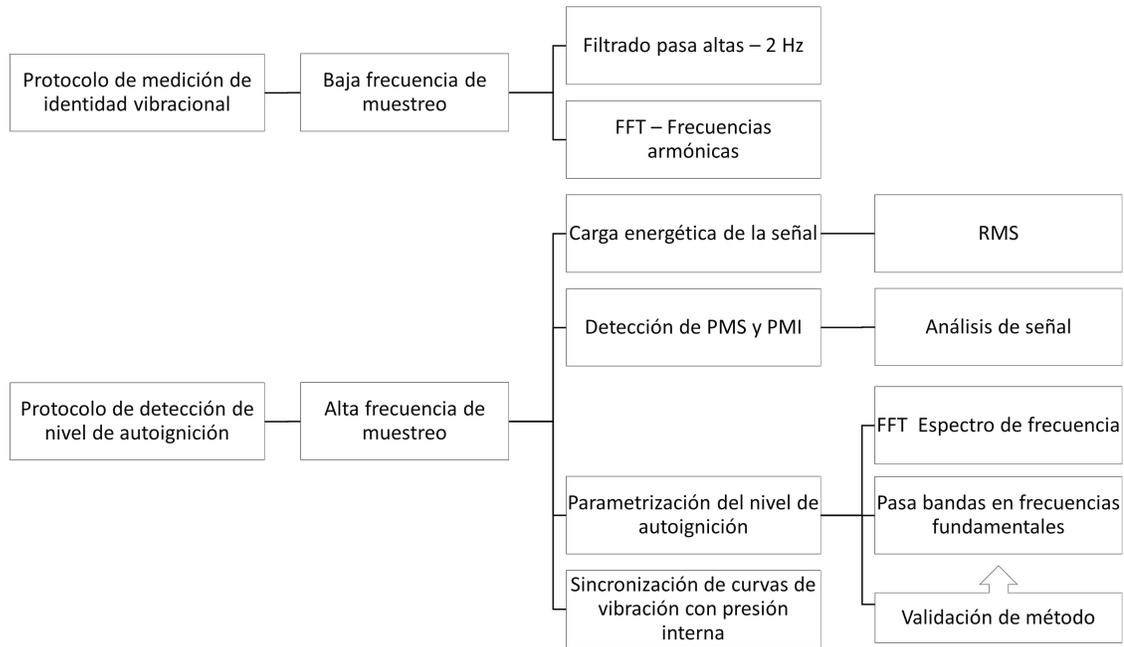


FIGURA 3.3: Diagrama de metodología para identidad vibratoria y detección del nivel de autoignición.

se varía la temperatura del aire de admisión a 38 °C de acuerdo al estándar MON [32] con una variante de 68 °C. El valor lambda se fija en 1, como referente de estequiometría en la mezcla y la frecuencia de muestreo para el acelerómetro varía en función de la metodología y el fin buscado. La matriz completa se encuentra en la Figura 3.4.

Esta matriz se estructuró para determinar la identidad del motor y considerar las posibles diferencias entre combustibles, de manera similar a como se realiza en la metodología de Rubio et al. [35]. A continuación se presentan las propiedades más importantes de los combustibles en la Tabla 3.4.

### 3.2.2 IDENTIDAD VIBRATORIA

De acuerdo al análisis preliminar es posible determinar la frecuencia estudiada en el motor como la harmónica fundamental a 15 Hz y las secundarias consecuentes.

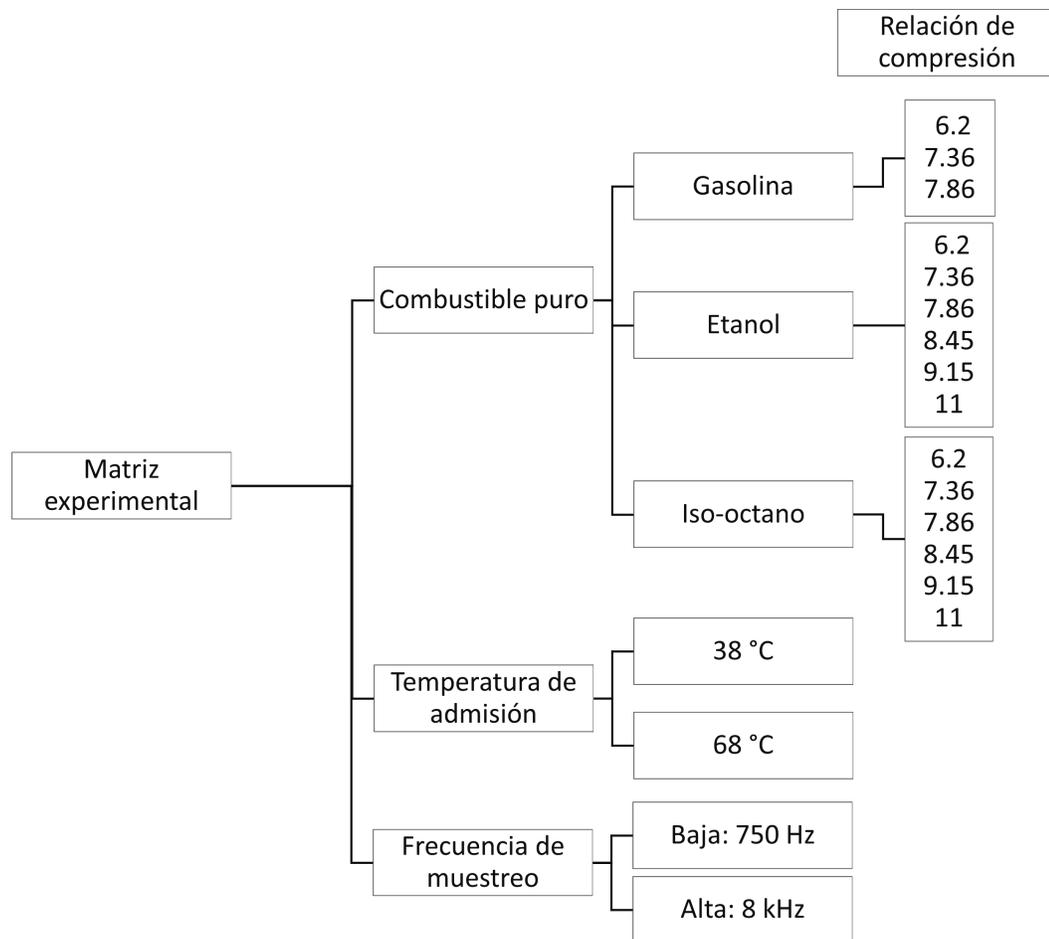


FIGURA 3.4: Matriz experimental general para identidad vibratoria y detección de nivel de autoignición.

Para estas muestras se realizó el seguimiento del motor durante 10 periodos de combustión con tal de obtener más de mil ciclos para describir el comportamiento del motor. Para facilitar el procesamiento de datos correspondientes a este segmento, el muestreo se realizó a 750 Hz que esta en el rango aceptado para cubrir las frecuencias fundamentales de acuerdo al Teorema de muestreo de Nyquist. Esto garantiza que el análisis posterior pueda cuantificar la intensidad de la señal y con ello construir la identidad vibratoria del motor.

Para poder procesar la señal, primero se realiza un filtrado de pasa altas a 2 Hz para remover lo que sería ruido de movimientos bruscos en el motor. Esta serie

TABLA 3.4: Especificaciones del acelerómetro.

Propiedades (Unidades)	PEMEX Magna	Etanol	Iso-octano
Temperatura de ebullición (°C)	225	78.3	99
Temperatura de autoignición (°C)	250	363	417.7
Poder calorífico (MJ/Kg)	44.1516	29.109	44.651
Índice de octano	87	101	100
Presión de vapor (kPa)	max. 54	5.85 @20 °C	6.6 @25 °C
Densidad relativa de vapor	3.0–4.0	1.59	3.93
Color	Rojo	Transp.	Transp.
Límites de explosividad inf. – sup.	1.3–7.1	3.3–19	1.1–6.0

de ruidos se generan ya sea por la estructura o el banco de pruebas en el que se encuentra instalado. La Figura 3.5 representa la señal filtrada en contraste con la Figura 3.1.

Una vez realizado el filtrado, es posible segmentar los datos para poder aplicar cualquier otro procesamiento de esta manera se consideran solo los ciclos correspondientes a combustión. De este modo, se realizan cortes en los datos, recuperando al rededor de 25 segundos de medición por periodo de combustión para poder recuperar más de 100 ciclos por periodo para cada una de las componentes dimensionales.

Posterior a la selección de los segmentos, se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) para determinar las frecuencias fundamentales en cada uno de los periodos de combustión. Con esto se obtuvo la identidad de ese segmento, por lo tanto el conjunto establece la identidad vibratoria de manera semejante a la metodología de Manhertz [34]. Esta se podrá observar de manera detallada para todas las componentes, en este caso la Figura 3.6 representa un solo periodo de combustión en la componente Y.

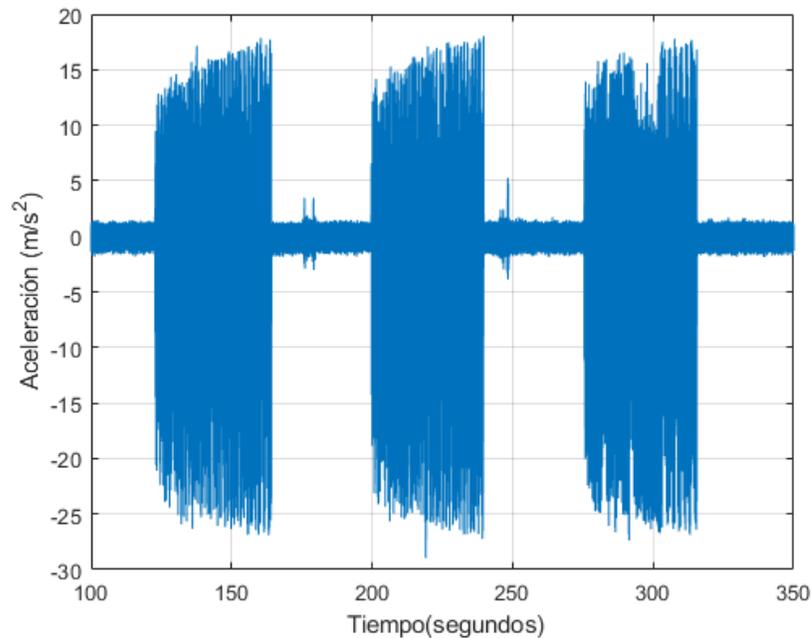


FIGURA 3.5: Detalle para historia de tiempo en la componente Y con filtrado pasa altas de 2 Hz.

### 3.2.3 DETECCIÓN DEL NIVEL DE AUTOIGNICIÓN

Para el proceso de detección la metodología es sustancialmente distinta. En este caso, la configuración de muestreo se cambia a 8 kHz este valor es elegido debido a que permanece por debajo del margen de error para el sensor compatible con el analizador y también porque en la literatura siempre se observan altas frecuencias de muestreo ya que las frecuencias analizadas van de un rango de los 2 – 20 kHz [36, 31].

Primeramente, la señal analizada corresponde solamente a un periodo de combustión, considerando nuevamente un corte de más de 100 ciclos. Se realiza un análisis del espectro de frecuencias mediante la FFT, que demostró una señal cargada por fuera del rango mencionado en otras metodologías como Bi et al. o también Joseph et al. [36, 37]. De acuerdo a este análisis, el corte de frecuencias para autoignición se determina mediante la Figura 3.7 en la cual se puede observar el pico principal entre

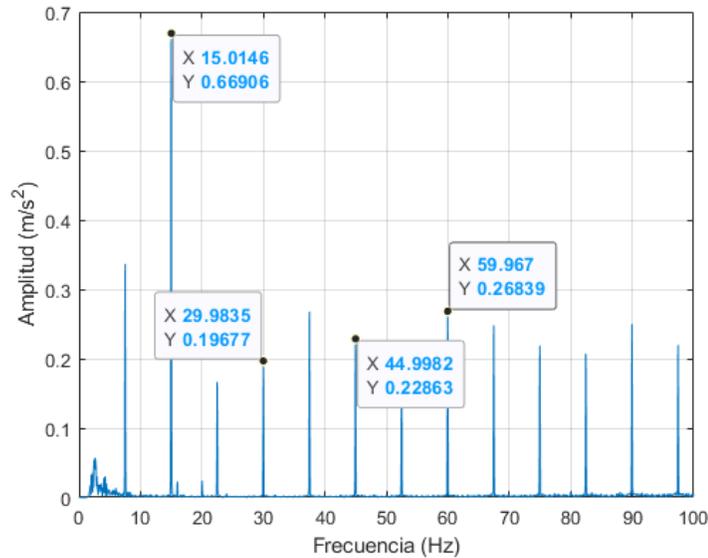


FIGURA 3.6: Magnitud para Transformada de Fourier en la componente Y

los 500 – 1000 Hz, a este fenómeno se le reconoce como *knock window* (en la lengua inglesa), para este trabajo se le denominará la traducción de **ventana de autoignición**. Esta adaptación a la metodología fue validada por medio de un vibrómetro láser con una resolución de muestreo mayor a una frecuencia de 22 kHz. Este es un equipo para realizar muestras puntuales de la velocidad del objeto por medio de la detección de láser de baja potencia, por lo que usa un método no invasivo para realizar el muestreo.

Una vez definida la ventana de autoignición fue posible filtrar los datos en ese rango, se utilizó un filtro pasabandas de 500 – 100 kHz respetando los valores de ventana. Posteriormente los ciclos tomados en consideración para el procesado fueron únicamente los últimos 34 del periodo de combustión, de acuerdo a la metodología de Rubio et al. [31] esto para comparar el mismo fenómeno desde la perspectiva vibratoria.

Para poder parametrizar el fenómeno, se realizó la misma metodología que Rubio, en la cual la intensidad de autoignición se define como el valor máximo de la señal resultante que en este caso corresponde a la máxima amplitud de la onda

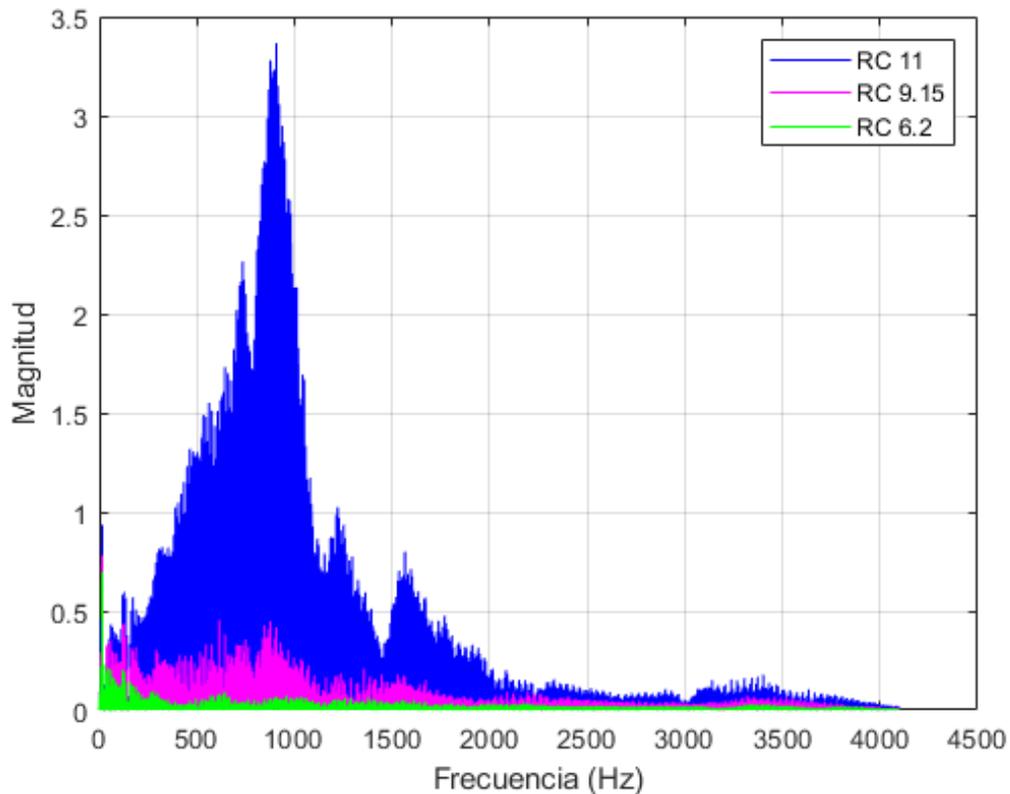


FIGURA 3.7: Ventana de autoignición por espectro de frecuencias.

provocada por el fenómeno vibratorio, como se muestra en la Figura 3.8.

El fenómeno naturalmente manifiesta valores negativos indicando que el movimiento percibido cambia de dirección, sin embargo, para analizar la señal se toma el valor absoluto de cada punto. Con esto se obtiene una metodología equivalente para el fenómeno vibratorio que permite compararlo con la presión interna en cámara, de manera similar a como lo describe el trabajo de Cavina et al. [38] Jones et al. [39]. El punto de vista energético solo puede ser visto desde la energía disponible en la señal, por lo que se determinó también la media cuadrática (RMS, por sus siglas en inglés), posterior al corte de la señal ciclo a ciclo.

Para poder realizar el corte de cada ciclo, fue necesario determinar el PMS y PMI del cilindro en la señal del acelerómetro, esto se llevó a cabo mediante la comparación de la señal por medio de la visualización del cierre de válvulas, de

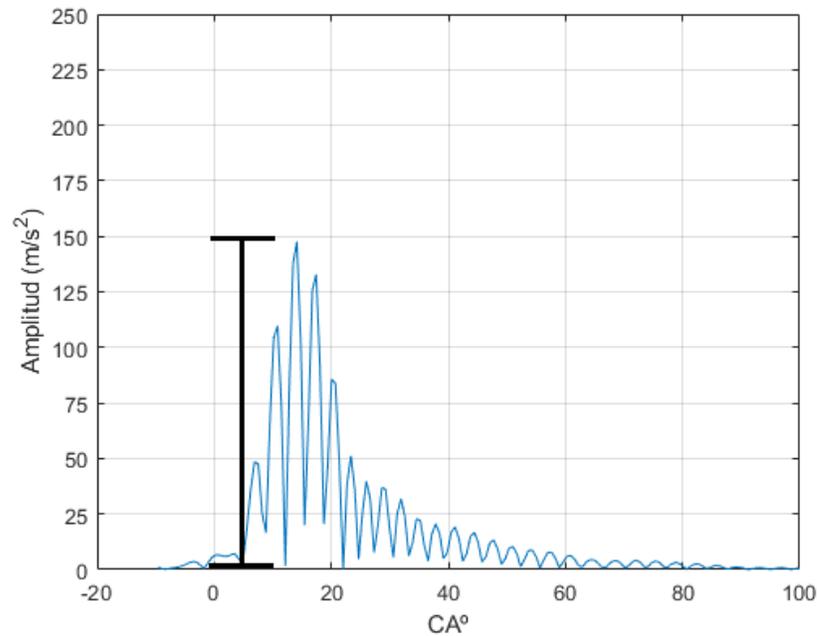


FIGURA 3.8: Intensidad de autoignición considerando el pico máximo de la señal de combustión en vibración.

manera similar a como lo hace Delvecchio et al. [40]. Al conocerse la localización del cierre de válvulas en la señal temporal, es posible hacer una correlación con el ángulo del cigüeñal y aproximar el PMS en la señal temporal. En la Figura 3.9 se observa la señal adaptada al ángulo del cigüeñal que refleja 3 picos, el primero en  $345^\circ$  APMS hace referencia al cierre de válvula de escape, el segundo en  $146^\circ$  APMS es el cierre de válvula de admisión y el último pico corresponde al proceso de combustión en el cual el pico estaría justo después del PMS.

A partir de la señal dada en paso angular, es posible determinar que la señal de combustión se puede observar siempre entre los ángulos  $10^\circ$  APMS y  $100^\circ$  DPMS. Por lo que los cortes de la señal para analizar el índice de autoignición se localizan en ese rango.

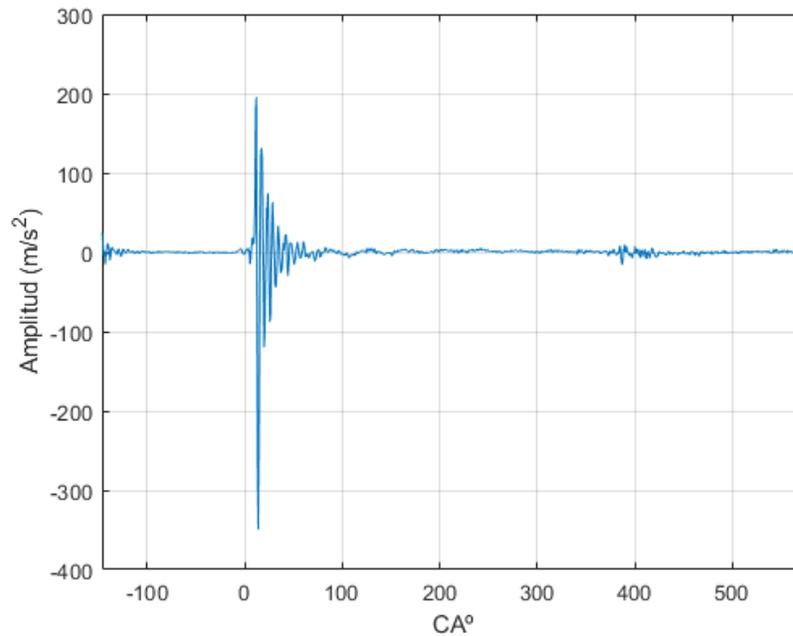


FIGURA 3.9: Tipo de señal en su equivalente de ángulo de cigüeñal.

### 3.2.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el procesamiento de datos se usó el programa Matlab<sup>®</sup> con un código diseñado para realizar el corte de datos, filtrado, detección de picos, filtrado de picos, transformación de señal temporal a paso angular, análisis estadístico y trazado de gráficos pre-eliminarios.

Durante la toma de datos, es posible apreciar que las curvas generadas son muy distintas en intensidad cuando se cambian las variables. De modo que la programación específicamente para selección de picos tuvo que ser desarrollada con un criterio de corte por parte del usuario, esto para semi-automatizar el corte.

Adicionalmente, algunas de las etapas de análisis fueron realizadas con filtros extraídos del paquete Vibration Matlab GUI de dominio público y bajo filtros diseñados en el entorno de Matlab.

## CAPÍTULO 4

# IDENTIDAD VIBRATORIA Y DETECCIÓN DE AUTOIGNICIÓN

---

*En este capítulo se presentan los resultados centrales de la investigación, primero se muestra la validación del método por medio del vibrómetro. Seguidamente se muestra la identidad vibratoria obtenida para cada componente direccional del moto. Posteriormente se muestran los resultados de detección de autoignición por vibración y su equivalente a la detección por presión interna en cámara.*

## 4.1 VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA

En la literatura se encuentran métodos de detección de autoignición por vibración a frecuencias de muestreo elevadas, de más de 20 kHz. En el caso de esta investigación, se usa una frecuencia baja por ello que la siguiente gráfica muestra el espectro vibratorio para dos pruebas de Etanol a distintas relaciones de compresión, el espectro abarca hasta frecuencias de 12 kHz. La Figura 4.1 muestra la mayor concentración del espectro por debajo de los 2 kHz.

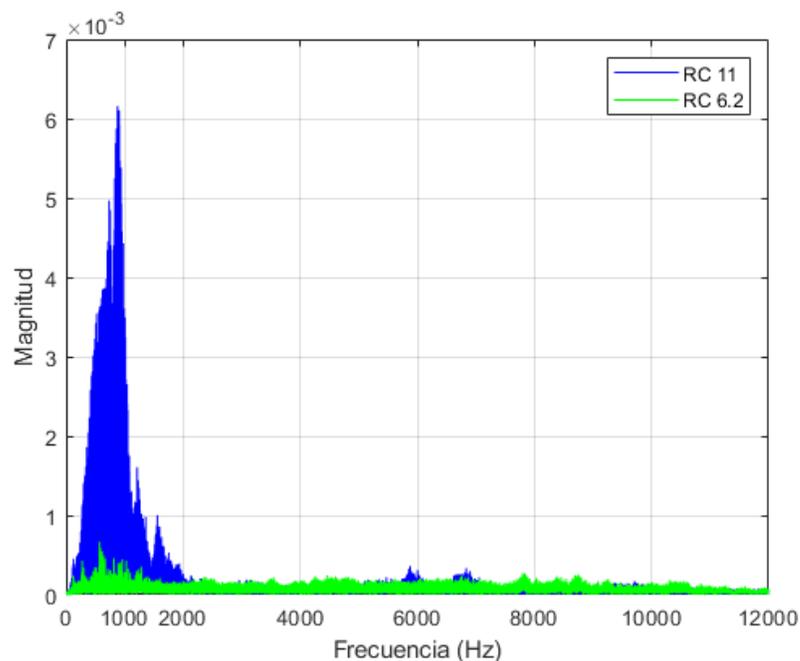


FIGURA 4.1: Primer resultado de análisis por vibrómetro para Etanol.

En la Figura 4.2 se muestra nuevamente, escalada a los primeros 4 kHz el cual es el límite para el muestreo del acelerómetro el cual muestra las 6 relaciones de compresión para las pruebas con Etanol. En ambas gráficas se puede apreciar con más detalle el tipo de picos principales se encuentran de 500 a 1000 Hz, por esto se selecciona el rango en la metodología principal.

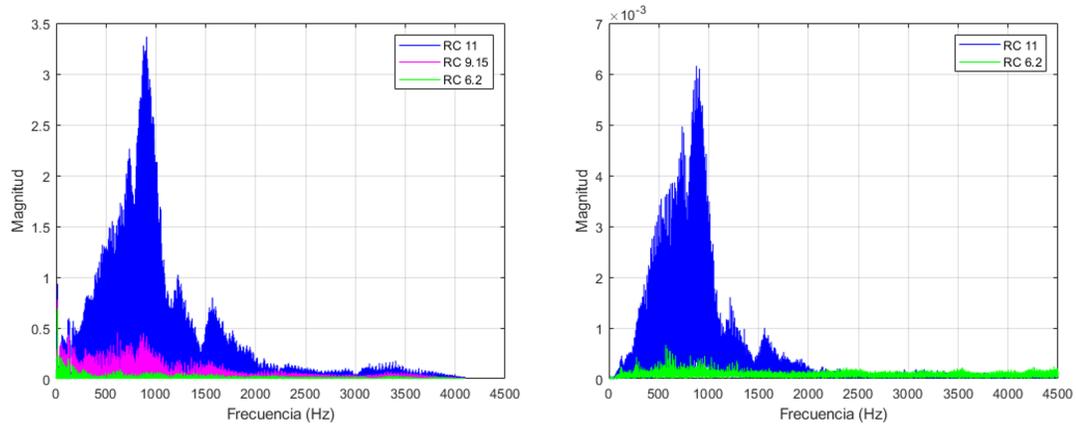


FIGURA 4.2: Espectro de frecuencias para etanol por acelerómetro (izquierda) y vibrómetro (derecha).

## 4.2 IDENTIDAD VIBRATORIA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos posterior al análisis de los datos a baja frecuencia de muestreo, únicamente aplicables para identidad de la frecuencia armónica principal y las secundarias. Se dividen entre combustibles debido a que, de acuerdo a la literatura, existen ligeras diferencias entre combustibles aún cuando las condiciones de operación son las mismas.

Las gráficas correspondientes a las frecuencias de identidad se dividen por combustible y temperatura de aire de admisión, con una subdivisión de las componentes en las que fue posicionado cada acelerómetro.

### 4.2.1 GASOLINA

En esta sección se presentan los resultados con respecto a la gasolina (G100), estos resultados pueden tomarse como los resultados base para la identidad. Esto debido a que el motor está diseñado particularmente para determinar el número de octano particularmente para gasolinas.

En la siguiente figura se representan 3 gráficas de las frecuencias armónicas para gasolina en los 3 componentes **X**, **Y** y **Z** para la temperatura de aire de admisión de 38 °C. Se puede observar la magnitud de amplitud para cada una de las armónicas: 15, 30, 45 y 60 Hz que identifican el movimiento estándar del motor.

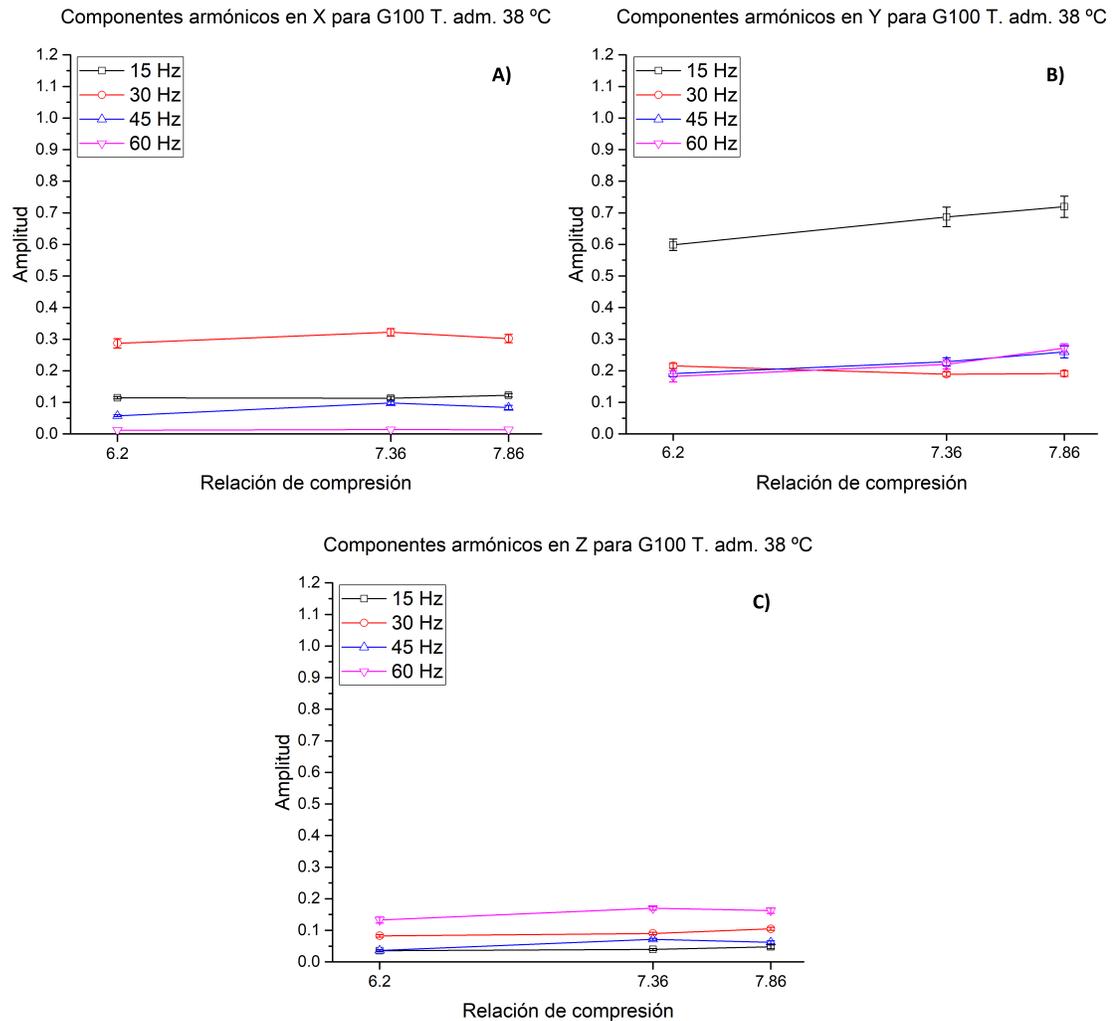


FIGURA 4.3: Identidad vibratoria para gasolina comercial con temperatura de aire de admisión a 38 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z.

En la sección A de la Figura 4.3 la frecuencia predominante se identifica como 30 Hz, mientras que las otras 3 permanecen cercanas a 0.1 o por debajo. Esto último denota que son prácticamente imperceptibles para esta instrumentación pero conllevan un orden en magnitud 15, 45 y 60 Hz de mayor a menor. Sin embargo el

nivel de 30 Hz da una referencia para identificar el combustible y las variables de referencia del motor. La sección B representa a la componente Y la cual se posiciona en la misma dirección en la que se desplaza el pistón, es por ello que la frecuencia fundamental de 15 Hz es predominante con un valor ascendente directamente proporcional a la relación de compresión con un máximo cercano a 0.7, mientras que las demás frecuencias muestran variación con valores que oscilan alrededor de 0.2.

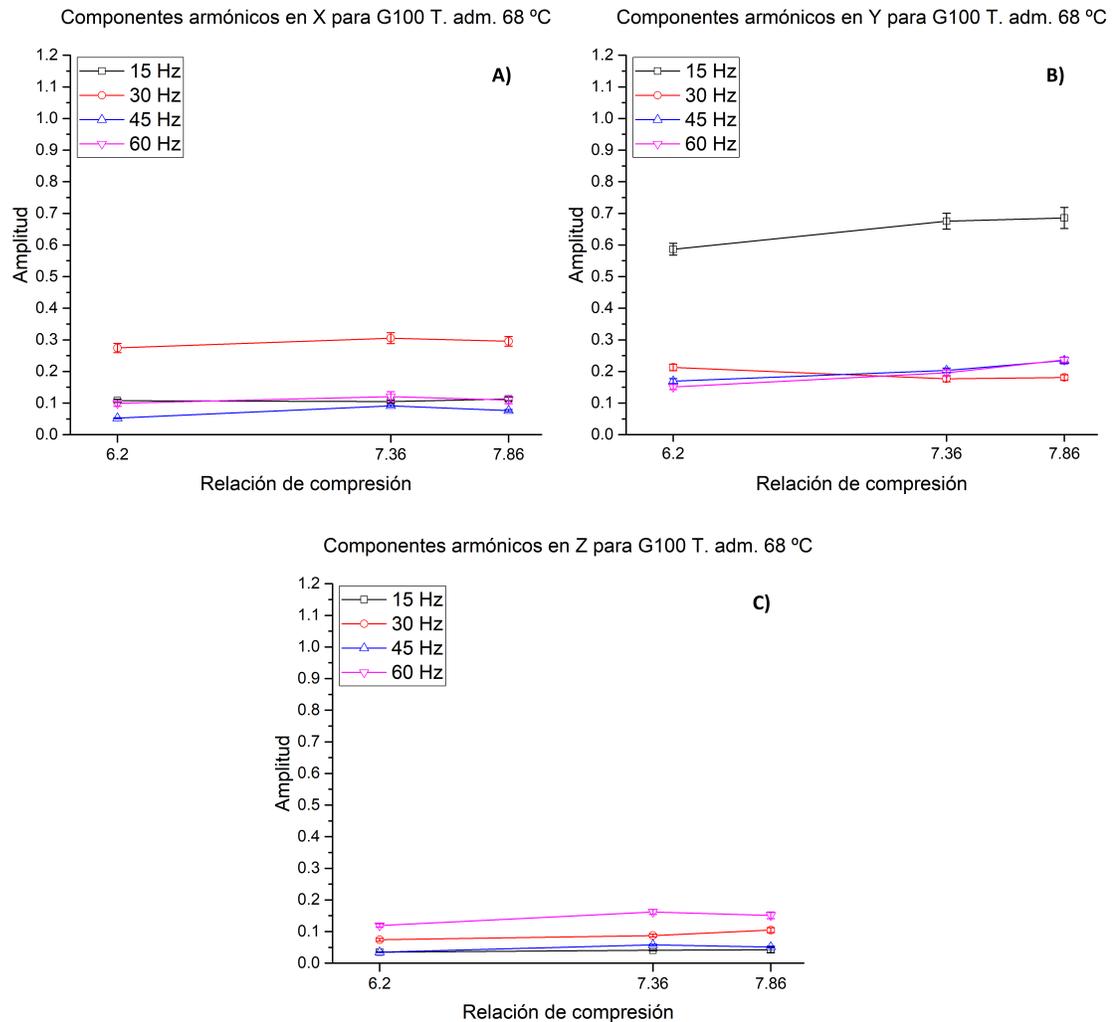


FIGURA 4.4: Identidad vibratoria para gasolina comercial con temperatura de aire de admisión a 68 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z.

En la sección C correspondiente a Z, casi todas las frecuencias son cercanas a 0.1 representando un orden de aparición descendente: 60, 30, 45 y 15 Hz.

De una manera semejante se compone la Figura 4.4 con las 3 componentes direccionales, temperatura de aire de admisión a 68 °C. Cada una de ellas permanece con tendencias bastante similares, sin embargo las frecuencias predominantes tienen un valor ligeramente menor que de gasolina a 38 °C, inclusive en el orden de las frecuencias con menos valor.

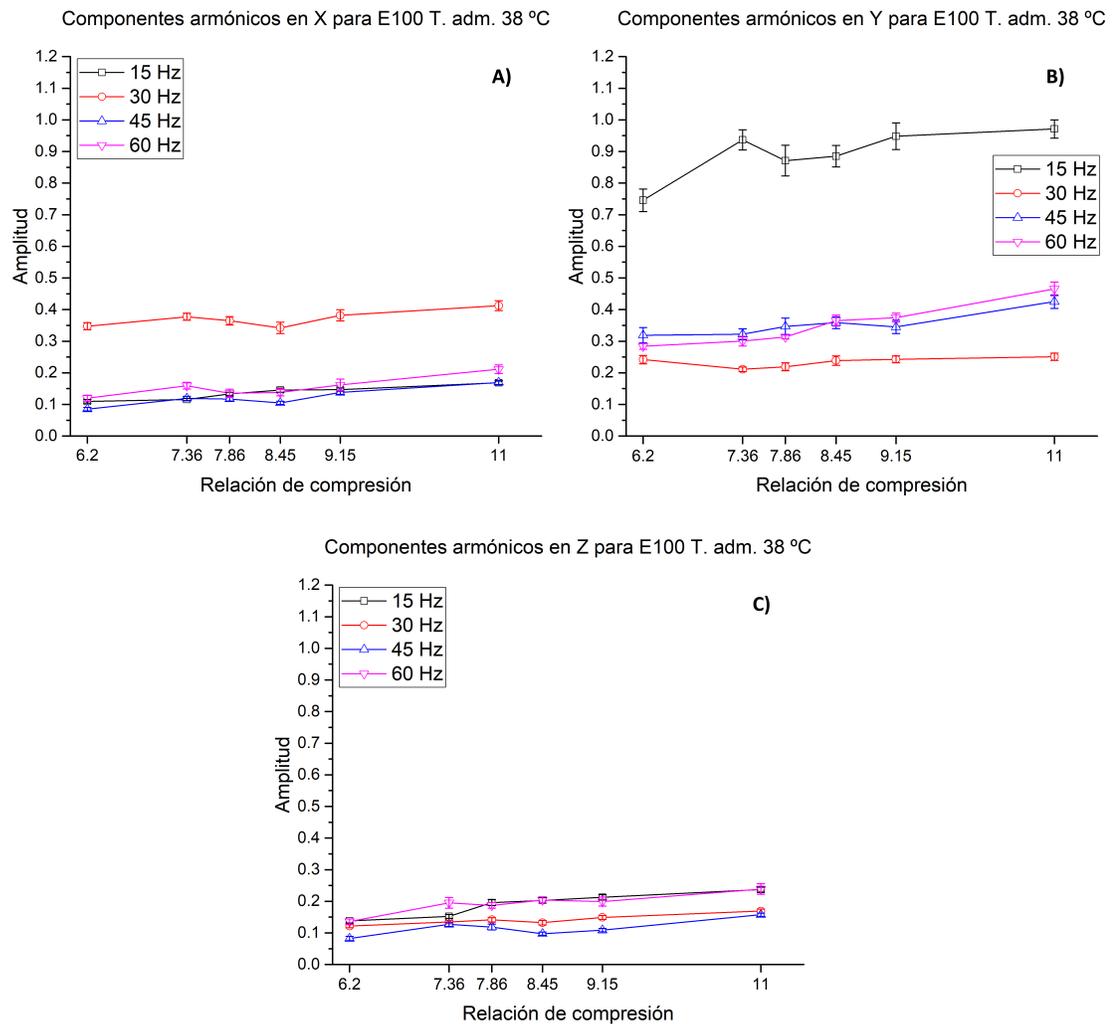


FIGURA 4.5: Identidad vibratoria para etanol con temperatura de aire de admisión a 38 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z.

En resumen, las frecuencias predominantes de la gasolina se pueden encontrar en la dirección X y Y principalmente con la frecuencia de 30 y 15 Hz respectivamente, de magnitud ligeramente menor para el caso de mayor temperatura de aire de

admisión. De las cuales la más predominante es la de 15 Hz en el eje Y, debido al desplazamiento del motor.

#### 4.2.2 ETANOL

Los resultados para etanol (E100) están presentados de una manera similar, sin embargo las gráficas se extienden hasta el valor 11 en la relación de compresión. Nuevamente para las 3 componentes se denotan variaciones en algunos valores, sin embargo la tendencia en las curvas es bastante similar.

En la Figura 4.5 se muestran los resultados para el caso de temperatura de aire de admisión a 38 °C, en la sección A que hace referencia al eje X se encuentra predominancia en la frecuencia de 30 Hz.

Nuevamente en la sección B correspondiente a la dirección Y del pistón, la frecuencia predominante es la de 15 Hz con valores por encima de los de gasolina, a la vez que el resto de las frecuencias se aprecian con mayor definición y magnitud, siendo la más pequeña de 30 Hz con alrededor de 0.25 de valor. Para la sección C también es notoria una diferencia porque el orden ahora comienza por 15 y 60 Hz, aunque permanece en valores cercanos a 0.1 para la magnitud.

En la Figura 4.6 se muestra el caso de 68 °C en los que nuevamente se observa la misma tendencia pero existen diferencias muy sutiles. Para el caso de la sección A la tendencia es muy similar en magnitud y forma en la frecuencia de 30 Hz, sin embargo, para las otras frecuencias se les ve más definidas, siguiendo entre ellas una tendencia muy similar. Para la sección B se muestra la misma frecuencia predominante de 15 Hz para el eje Y con una tendencia y magnitud en las otras frecuencias. Del mismo modo en la sección C, se ven ordenadas de modo similar, teniendo predominancia las de 15 y 60 Hz en magnitud.

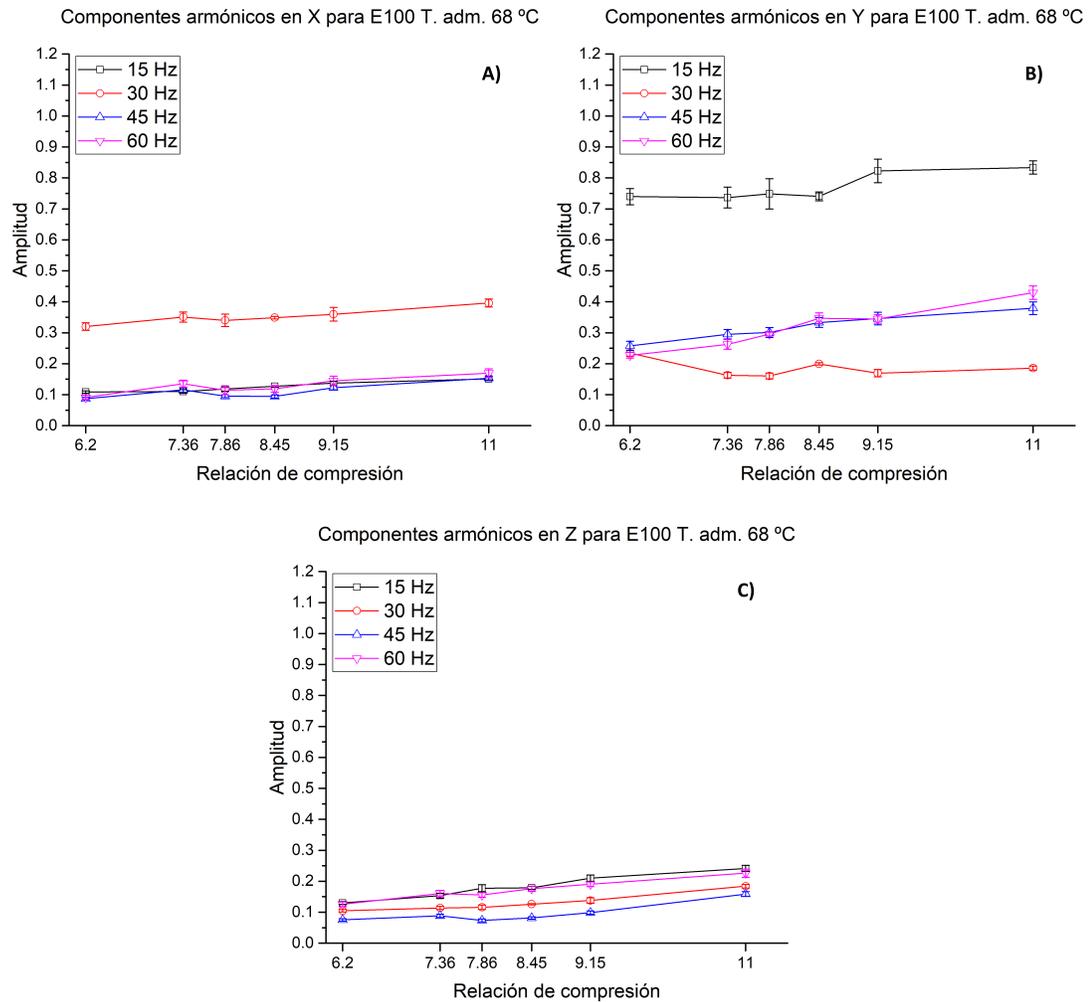


FIGURA 4.6: Identidad vibratoria para etanol con temperatura de aire de admisión a 68 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z.

### 4.2.3 ISO-OCTANO

En el caso del iso-octano se ve representado del mismo modo, la identidad se muestra en las 3 direcciones para las 4 frecuencias. En la Figura 4.7 se puede observar para la sección A a la dirección en X, en esta incrementa la magnitud de la frecuencia en 30 Hz, a diferencia de los otros combustibles. Así mismo, las otras frecuencias se observan más definidas y en un orden particular para 15, 45 y 60 Hz consecutivamente con valores entre 0.1 y 0.2 de magnitud.

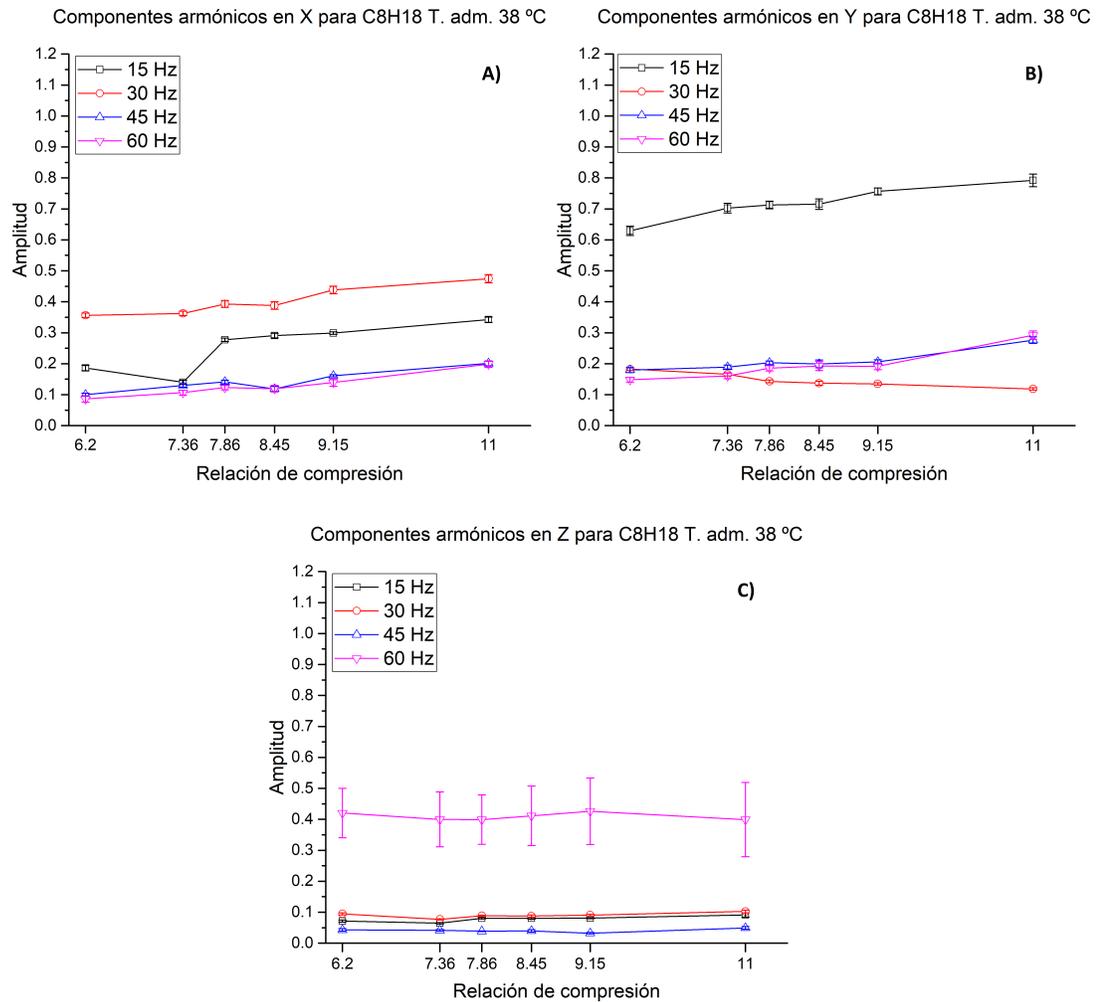


FIGURA 4.7: Identidad vibratoria para iso-octano con temperatura de aire de admisión a 38 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z.

En la sección B se encuentra representada la dirección Y, en donde la frecuencia fundamental de 15 Hz resalta en todos los casos. Particularmente en esta sección se encuentra una similitud tanto en orden como en la magnitud de frecuencias en comparación con las pruebas de gasolina. La frecuencia fundamental de 15 Hz conserva valores de entre 0.6 y 0.7 para las primeras 3 relaciones de compresión y una tendencia ascendente para las 3 posteriores. En las otras frecuencias sucede similar, 45 y 60 Hz conservan una tendencia ascendente en valores de magnitud semejantes a gasolina, mientras que 30 Hz repite una tendencia descendente.

Por otro lado, la sección C representa el eje Z, en este caso en particular se observa la frecuencia de 60 Hz como la predominante con valores alrededor de 0.4 en magnitud. El orden de las otras frecuencias se encuentra en 30, 15 y 45 Hz descendente.

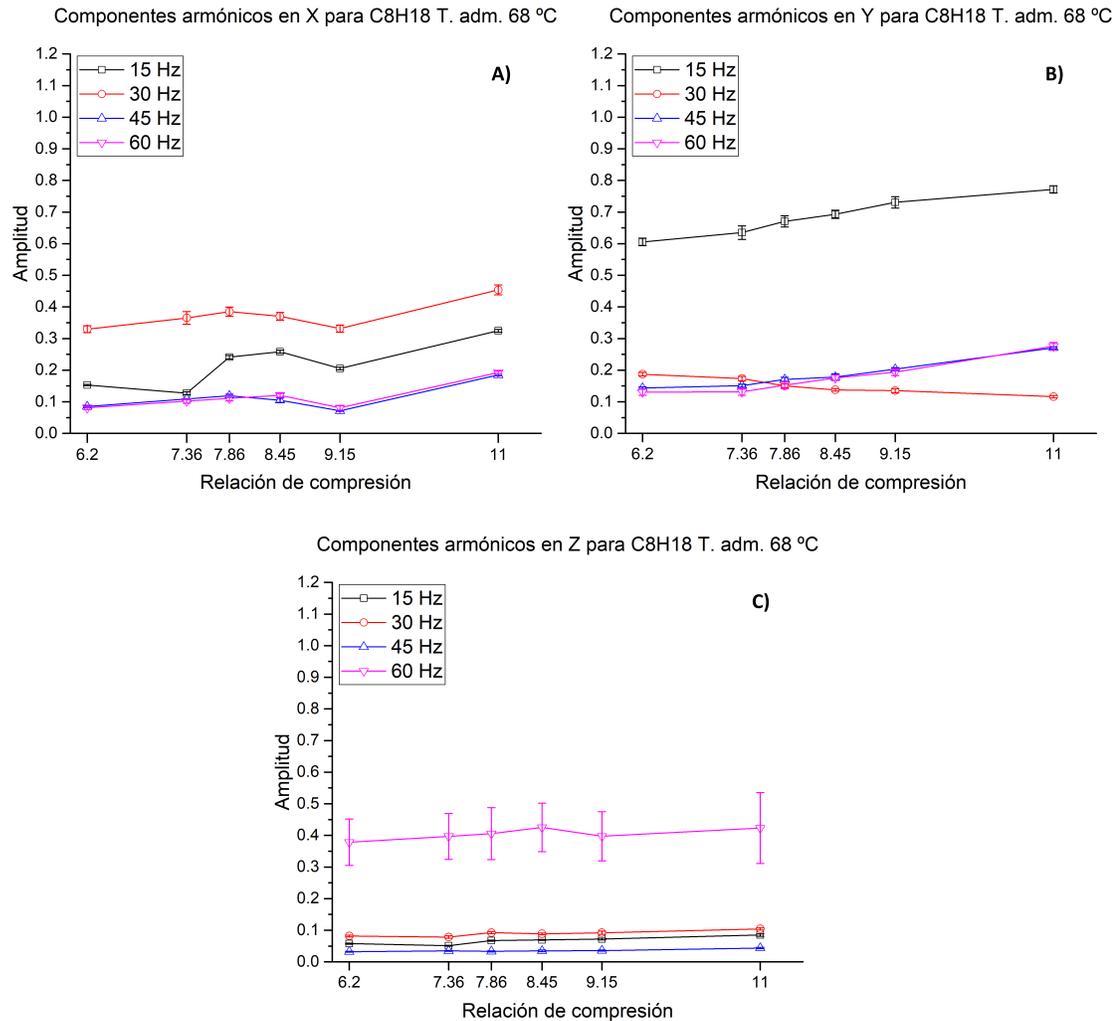


FIGURA 4.8: Identidad vibratoria para iso-octano con temperatura de aire de admisión a 68 °C, A) Componente X, B) Componente Y, C) Componente Z.

En la Figura 4.8 se representa la identidad vibratoria para el iso-octano que se encuentra similar para el caso de gasolina. En la sección A se muestra nuevamente la frecuencia de 30 Hz, por encima de 0.3 de magnitud, mientras que en el orden descendente continua 15 Hz y posteriormente 45 y 60 Hz.

En la sección B se asemejan los primero 3 puntos a gasolina para la frecuencia predominante de 15 Hz aunque todos los puntos se encuentran por arriba de 0.6 de magnitud, ligeramente mayor que con la gasolina. Nuevamente la frecuencia de 30 Hz lleva una tendencia descendente mientras que el resto ascendentes como con la gasolina.

Para la sección C se encuentra una diferencia notable en el valor de la frecuencia predominante la cual es de 60 Hz mucho mayor a la de gasolina, en este caso de más de 0.3 de magnitud. Mientras que las frecuencias menos representativas solo se encuentran bien definidas en orden de 30, 15 y 45 Hz.

### 4.3 DETECCIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE AUTOIGNICIÓN

Para esta sección primero se muestran los resultados respecto a vibraciones para cada uno de los combustibles, de manera que se describen los valores encontrados y la tendencia. Posteriormente, se presentan los análisis en conjunto con la presión interna en cámara y la comparación con la autoignición detectada por vibración.

En las secciones de combustibles se presentan las gráficas correspondientes a la intensidad de autoignición tal como se definió en el Capítulo 3. De modo que las gráficas poseen 4 curvas en las que se encuentran el promedio y máximo para el análisis de ciclos en ambas temperaturas de aire de admisión 38 y 68 °C, para las relaciones de compresión correspondientes a cada combustible con respecto a la amplitud de la onda dada por la aceleración.

### 4.3.1 GASOLINA

En la Figura 4.9 se pueden observar en ambos casos pendientes positivas para las curvas, en este caso en particular solo son 3 puntos pero se denotan con una pendiente decreciente mientras se eleva la relación de compresión. En el caso de la gasolina se toma la relación de compresión 6.2 como combustión normal, mientras que las posteriores se clasifican con alto nivel de autoignición de acuerdo a el límite encontrado en la detección de autoignición por presión interna.

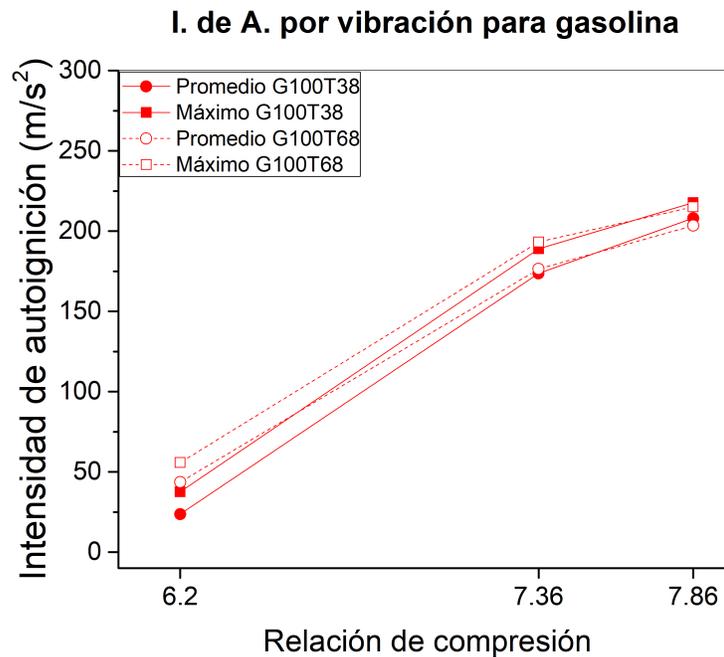


FIGURA 4.9: Parametrización de autoignición de acuerdo a la vibración del bloque del motor para gasolina.

Para el caso particular de la gasolina, tanto los promedios como máximos están muy estrechamente relacionados en cuanto a valores, son muy similares para temperatura de 38 y 68 °C. La tendencia muestra que la temperatura de 68 °C posee mayor nivel de autoignición para relación de compresión de 6.2 mientras que se invierte al llegar a 7.86, en la cual la temperatura de 38 °C se vuelve con mayor nivel de autoignición.

### 4.3.2 ETANOL

La representación del etanol se encuentra en la Figura 4.10. En general, se muestra una tendencia ascendente y con una pendiente que tiende a incrementar por lo que la curva tiende a hacerse pronunciada en dirección vertical. En este caso particular, solo el último punto se considera con alto nivel de autoignición, ya que todos los anteriores se ven comparados por debajo del límite con respecto a la presión interna en cámara.

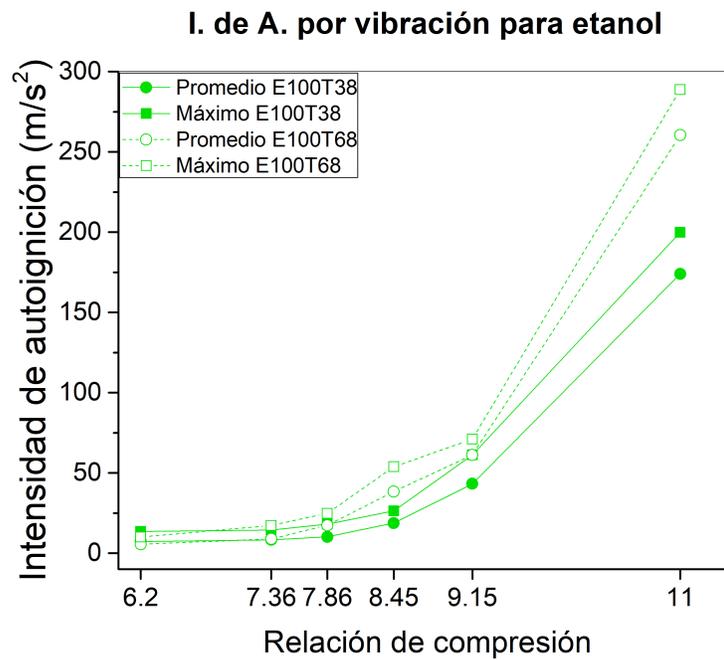


FIGURA 4.10: Parametrización de autoignición de acuerdo a la vibración del bloque del motor para etanol.

Por otro lado, la tendencia es que a 68 °C se vea un nivel más elevado de autoignición, exceptuando el primer punto que se refiere a la relación de compresión de 6.2.

### 4.3.3 ISO-OCTANO

En el caso del iso-octano, como combustible de referencia posee un número de octano muy similar al etanol por lo que las curvas se ven bastante similares, tanto en valores como en tendencia.

En la Figura 4.11 se muestran las curvas correspondientes al iso-octano, en la cual todas siguen una tendencia ascendente con una pendiente que también tiende a incrementar.

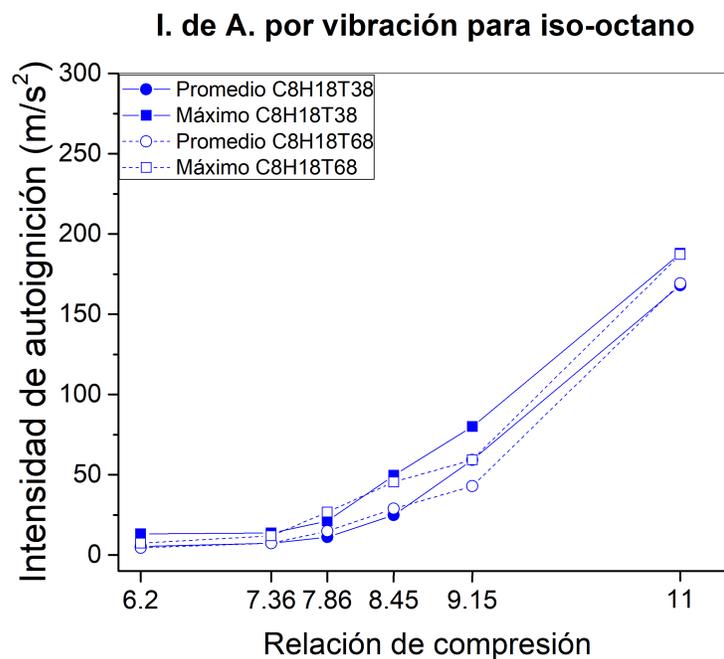


FIGURA 4.11: Parametrización de autoignición de acuerdo a la vibración del bloque del motor para iso-octano.

De acuerdo a los índices obtenidos por presión interna todas las relaciones de compresión a excepción de 11 corresponden a combustión normal. Sin embargo, la tendencia entre temperaturas no se encuentra totalmente definida, para las relaciones de 6.2, 7.36 y 9.15 la autoignición es ligeramente mayor para 38 °C mientras que este fenómeno se invierte para las otras relaciones de compresión en 68 °C.

#### 4.3.4 ANÁLISIS CONJUNTO Y PARAMETRIZACIÓN

Las gráficas a continuación presentan la comparativa entre los valores de presión interna e índice de autoignición, medidos por la metodología de Rubio et. al. [31] en comparación a los datos que se han medido por el método presentado en este trabajo. En todas las gráficas se presentan los promedios de los valores tomados ciclo a ciclo.

En la Figura 4.12 se presentan los promedios de la presión interna en cámara, tomando como referencia el máximo pico de presión de acuerdo a Rubio et. al. [31]. En general, las tendencias son muy variables, para el caso de gasolina y etanol se muestra un punto de cambio para la tendencia en temperatura, mientras que para iso-octano se conserva la temperatura de 68 °C como la que lidera la presión interna.

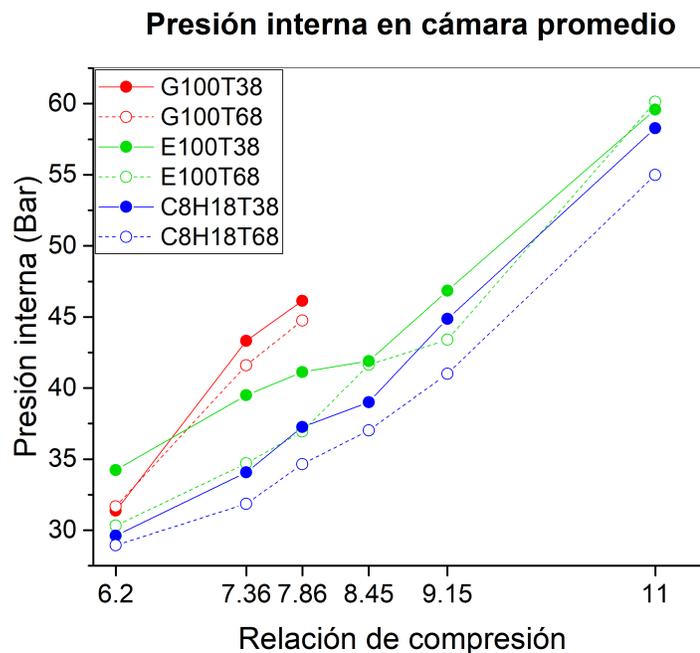


FIGURA 4.12: Pico máximo de presión interna en cámara promediado para todos los combustibles.

Para el caso del nivel de autoignición por presión interna en cámara se presenta la Figura 4.13. En esta se pueden apreciar los promedios de ambas temperaturas para

todos los combustibles, como ya se ha mencionado, los niveles elevados de autoignición inician a partir de 50 kPa para todos los combustibles. En todos los combustibles se nota una tendencia ascendente con una pendiente que tiende a incrementar.

En el caso particular de gasolina y etanol, la temperatura de aire de admisión de 68 °C posee un nivel de autoignición mayor para todas las relaciones de compresión. Caso contrario sucede con isoctano, la tendencia se invierte a partir de la relación de compresión 8.45 en adelante, y la temperatura de aire de admisión con mayor nivel de autoignición es ahora de 38 °C.

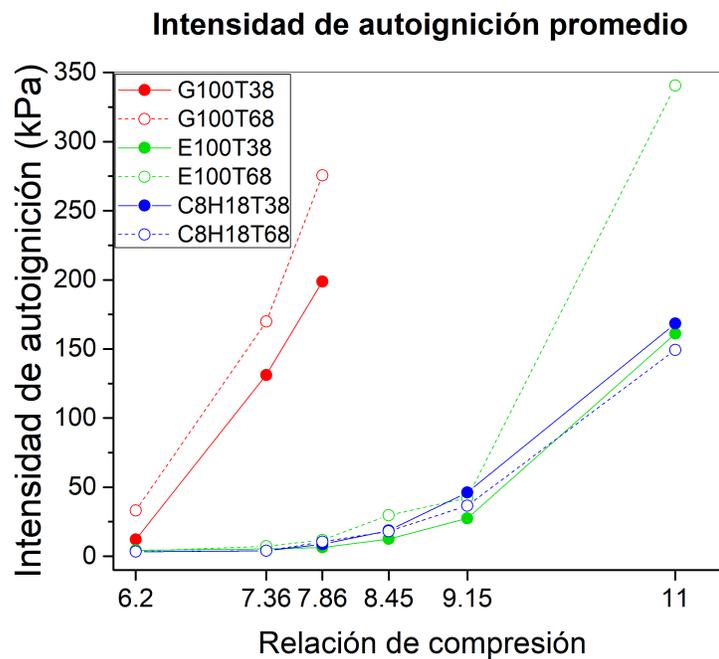


FIGURA 4.13: Intensidad de autoignición por presión interna en cámara promediada para todos los combustibles.

Posteriormente, se presenta el contraste de la intensidad de autoignición por medio de la vibración en el bloque del motor. La intensidad de autoignición fue calculada con una metodología semejante a la de Rubio et. al. [31] de acuerdo a lo mencionado en el Capítulo 3.

La autoignición detectada por vibraciones en bloque del motor se presentan en

la Figura 4.14. En cuanto a las tendencias, existen diferencias sustanciales cuando se compara con la detección por medio de presión interna en cámara. La curva que corresponde a gasolina se muestra por completo con una tendencia ascendente, sin embargo, la pendiente comienza a disminuir en vez de aumentar, por otro lado la tendencia con respecto a las temperaturas y la intensidad de autoignición se invierte para el punto de 7.86 en la relación de compresión.

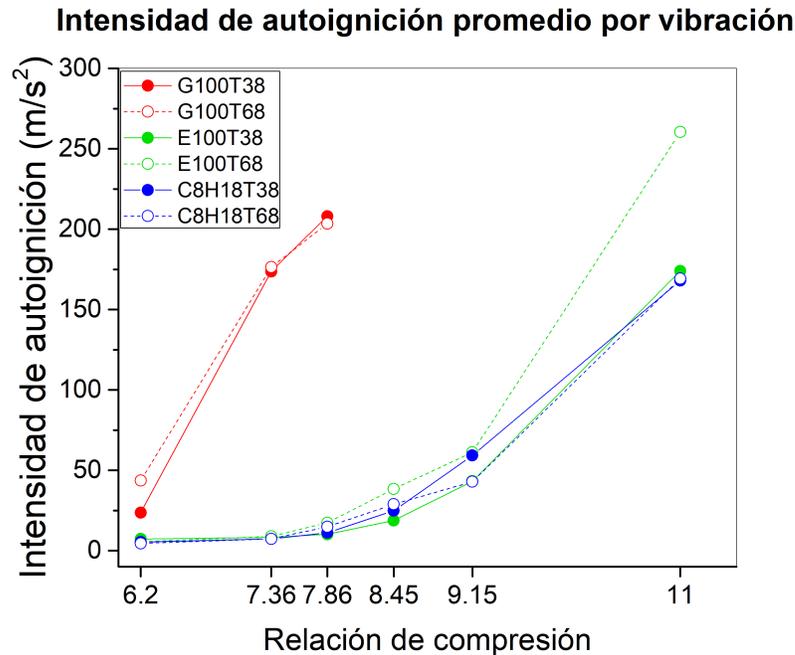


FIGURA 4.14: Intensidad de autoignición por vibración promediada para todos los combustibles.

En el caso del etanol, tanto tendencia como pendiente de las curvas son bastante apegadas a las vistas en presión interna. La temperatura de 68 °C predomina en la intensidad de autoignición y es notable una diferencia con la curva de 38 °C. Para el caso del iso-octano, la tendencia es cambiante y ambas curvas se encuentran estrechas una de la otra. Para las relaciones de compresión de 6.2 y 9.15 los puntos con mayor nivel de autoignición corresponden a la temperatura de 38 °C, mientras que para los demás se conserva ligeramente la tendencia en donde la temperatura más alta conlleva más autoignición.

## 4.4 CARGA ENERGÉTICA DE LA SEÑAL

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para la señal de acuerdo al corte de autoignición. De este modo, la metodología de proceso es la misma sin embargo, la carga energética se obtiene de la misma señal a la que se le hace referencia en el análisis de autoignición. En la Figura 4.15 se representa el valor para esta señal en cada uno de los casos.

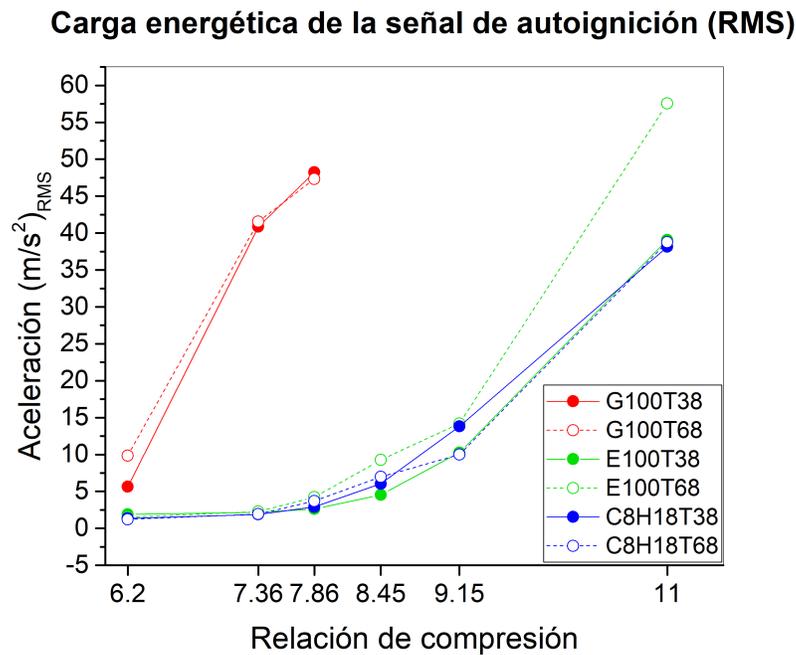


FIGURA 4.15: Carga energética de la señal.

En caso de la tendencia, es muy semejante a las curvas de nivel de autoignición por vibración y esto es correcto pues se analiza toda la señal correspondiente a la explosión. Aunque con distintos valores, la tendencia y proporción se conservan para todos los combustibles en ambas temperaturas de autoignición.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

---

*En este capítulo se describen las conclusiones encontradas con los resultados de esta investigación y se presenta el análisis de las mismas. Adicionalmente se proponen mecanismos de mejora y complemento a la investigación para continuar con la línea de estudio.*

## 5.1 CONCLUSIONES

A continuación se presentan los análisis realizados a partir de los resultados de este trabajo y su comparativa con trabajos anteriores, algunos de los cuales fue basado el mismo. Cabe recordar que este proyecto tiene como propósito sentar las bases que anteceden al análisis energético desde el punto de vista mecánico y termodinámico del fenómeno de la autoignición, por lo que las conclusiones se presentan con respecto a la detección de la autoignición y al análisis energético de la señal vibratoria, únicamente.

El primer resultado hace referencia a la validación de la metodología para la detección, si bien es semejante a la ya establecida por Rubio para la presión interna en cámara, se contrasta con la metodología usada por Cavina et al. [38], de manera que para distintas velocidades del motor se optimiza la detección dependiendo del resultado en el espectro de frecuencias. La Figura 3.6 obtiene el espectro realizado para la velocidad de 900 rpm mientras que Cavina obtiene el espectro para la velocidad más baja de 3000 rpm dada por su instrumentación, es visible que cada una de las velocidades obtiene un patrón distinto para el espectro de frecuencias en comparación con el resto de la literatura.

### 5.1.1 IDENTIDAD VIBRATORIA Y CARGA ENERGÉTICA DE LA SEÑAL

En las gráficas de la Sección 4.2 se presentaron los valores característicos de la armónica fundamental y sus frecuencias secundarias para cada combustible. Sobre estas se encontraron las siguientes conclusiones:

- Las componentes direccionales se manifiestan de acuerdo a lo esperado, según la dirección en la que se encuentra ubicado el pistón. De acuerdo a Santana et.

al. [Santana2021], se observa semejante a su trabajo, debido al desplazamiento del pistón y la generación del torque.

- El componente más importante es el de mayor magnitud de 15 Hz ya que incrementa de acuerdo al incremento de la relación de compresión. Esto concuerda con el trabajo de Manhertz et al. [34], la potencia esperada en el motor incrementa por la relación de compresión, mientras que en su trabajo disminuye por la disminución del factor lambda, lo cual va de acuerdo a la literatura.
- En los tres combustibles se muestran distintos valores y patrones en el orden de aparición de las frecuencias fundamentales. Si se toma como base la gasolina, ya que el diseño del motor fue basado en gasolina, se pueden encontrar las variaciones entre combustibles.
- En general, el cambio en la temperatura de admisión no afecta el orden en la aparición de frecuencias, por otro lado afecta la magnitud de los valores de acuerdo a cada combustible. Este hecho, deja como válida la identificación de un combustible por su patrón de vibración y es posible que pueda tener una liberación de energía distinta para cada uno.
- En casi todos los casos se observa predominante la frecuencia de 30 Hz para la componente X, la frecuencia 15 Hz para la componente Y y la frecuencia de 60 Hz para la componente Z, esto dictamina un patrón propio del motor con variaciones de acuerdo al combustible. En el caso de gasolina e iso-octano se observan coincidencias en la componente Z para la frecuencia de 60 Hz que a pesar del ruido observado en las gráficas de iso-octano es posible concluir que la magnitud se ve afectada por el tipo de combustible, si se comparan con el etanol.
- La diferencia entre el patrón del combustible puede deberse a las condiciones químicas que generan dentro de la cámara de combustión y por las cuales las frecuencias tienen distinto tipo de comportamiento. Santana et al. [41] realiza un estudio vibratorio involucrando otras variables, sin embargo al evaluar

gasolina y etanol encuentra un aumento en el nivel de vibraciones, tal como se describe en los resultados de este trabajo para la componente Y. Para para la metodología de Santana el aumento fue de un 31 % mientras que para este trabajo se encontró de un aproximado del 15 %.

- En el caso de la carga energética (RMS) se encontraron tendencias similares a el caso de autoignición, si bien esta metodología no arroja una descripción detallada de frecuencias, es un promedio de todas las que fueron consideradas por el filtrado. Esto permite conocer el tipo de intensidad obtenida para cada condición en el motor [40]. En comparativa, debe seguir la misma tendencia que se asume para la potencia como con el trabajo de Manhertz [34], sucede de manera semejante para este trabajo, aumentan conforme se espera que la potencia aumente.

### 5.1.2 COMPARATIVA PARA DETECCIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE AUTOIGNICIÓN

Antes de presentar las conclusiones de esta sección se debe hacer énfasis que la metodología elegida es una de las más básicas para la detección de autoignición y no es una técnica de frontera, la cual se dedica a la detección de autoignición en tiempo real. En el caso de la autoignición detectada por esta técnica, hay ciertas distinciones de nivel de autoignición en comparación con la técnica de presión interna en cámara y es precisamente recalcar las diferencias lo que se propone con este análisis.

- Existe una diferencia sustancial entre métodos de detección de autoignición aplicados en este banco experimental. Sin embargo, la distribución de valores es consistente para ambos.
- Las tendencias son semejantes para el caso de etanol e iso-octano, ambas conservan una pendiente que incrementa para ambas curvas. Por otro lado, en el

caso de la gasolina, aunque la tendencia incrementa los valores con curvas muy bien definidas, la pendiente tiende a disminuir. Esto puede deberse al descarte de frecuencias realizado por la metodología en vibraciones.

- Parcialmente se observa una distinción entre temperaturas de admisión, si se comparan ambas curvas para cada uno de los combustibles. Esto ocurre debido a la sensibilidad del método, si se tiene como definido que la temperatura proporciona cierto rango de frecuencias a considerar, es posible que el filtro elegido no sea el óptimo para este tipo de distinción. Por denotar un caso, se puede observar las curvas para gasolina, cuando el método por presión las define completamente separadas, el método de vibración proporciona valores muy cercanos y en el punto de relación de compresión de 7.86 se observa que la curva cambia de posición, siendo la temperatura de 68 °C la de menor nivel de autoignición.
- En contraste, esto no sucede con el etanol, para este combustible el filtrado no parece tener ningún tipo de deficiencia, ya que respeta la tendencia y orden de valores para ambas temperaturas de aire de admisión. Para ambos métodos, el único valor de nivel de autoignición que aparece invertido para el etanol es la relación de compresión de 6.2. Estos fenómenos sugieren que ambos combustibles ofrecen un rango de frecuencias de autoignición distintas, y que probablemente la temperatura de aire de admisión está en un rango definido para cada combustible.
- En el mismo análisis, puede decirse que el iso-octano se comporta de manera semejante a la gasolina, esto al encontrar una relación estrecha en las curvas para ambas temperaturas. Nuevamente la tendencia es semejante si se comparan ambos métodos, sin embargo las curvas por temperatura no se encuentran tan definidas como con el etanol. Se propone que este evento sea efecto de la composición química del combustible y que para su detección es necesario ajustar el método a cada combustible.

## 5.2 PERSPECTIVAS A FUTURO

Entes de poder estudiar la liberación energética exclusiva por vibraciones, es ideal conocer qué parámetros afectan el nivel de vibración. Dicho esto se recomienda proseguir con este trabajo desde 2 enfoques distintos que terminarán complementándose.

1. Se debe definir el patrón generado por combustible, con ello generar una curva de manera detallada para corroborar las tendencias a lo largo de sus variables. En este caso en particular sería considerar ambas curvas generadas por relación de compresión y temperatura de aire de admisión. Ya que un mayor nivel de vibración en ciertos puntos, presupone un mayor nivel de energía liberada a través de esta.
2. Estas dos variables forzosamente están relacionadas si se compara el nivel de autoignición, por ello que para poder tener la certeza de como afecta el nivel de autoignición, también deberá realizarse la detección de manera óptima por vibraciones, tanto si esta se ve afectada por la temperatura de aire de admisión o bien el tipo de combustible.

A partir de estas dos premisas, se recomienda ampliamente realizar un estudio más detallado sobre la identidad vibratoria de este motor y a su vez segmentar y profundizar la metodología que realiza de detección del nivel de autoignición por vibraciones en este banco experimental, para de este modo comprender con mayor amplitud la afectación de las variables en la aparición de la autoignición.

## APÉNDICE A

# FICHAS TÉCNICAS

---

Nota: estos datos fueron extraídos de los manuales publicados en el sitio web del fabricante.

# A.1 HOJA DE DATOS PARA ACELERÓMETRO 352C22

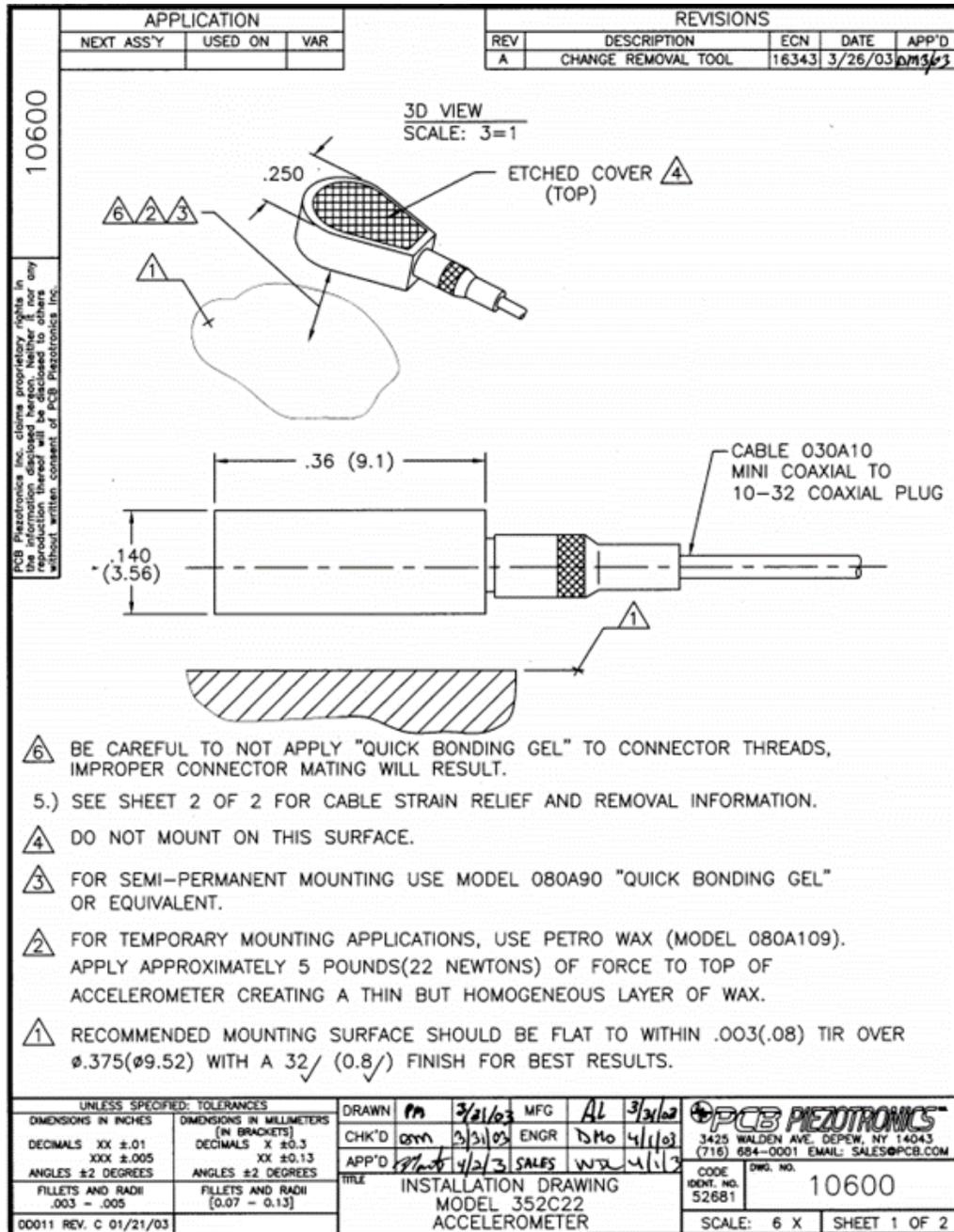
	<u>ENGLISH</u>	<u>SI</u>	
<b>Performance</b>			
Sensitivity(± 15 %)	10 mV/g	1.0 mV/(m/s <sup>2</sup> )	
Measurement Range	± 500 g pk	± 4900 m/s <sup>2</sup> pk	
Frequency Range(± 5 %)	1.0 to 10,000 Hz	1.0 to 10,000 Hz	
Frequency Range(± 10 %)	0.7 to 13,000 Hz	0.7 to 13,000 Hz	
Frequency Range(± 3 dB)	0.3 to 20,000 Hz	0.3 to 20,000 Hz	
Resonant Frequency	≥ 50 kHz	≥ 50 kHz	
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.004 g rms	0.04 m/s <sup>2</sup> rms	[1]
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	[2]
Transverse Sensitivity	≤ 5 %	≤ 5 %	
<b>Environmental</b>			
Overload Limit(Shock)	± 10,000 g pk	± 98,000 m/s <sup>2</sup> pk	
Temperature Range(Operating)	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	[1]
Temperature Response	See Graph	See Graph	[1]
<b>Electrical</b>			
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≤ 300 Ohm	≤ 300 Ohm	
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC	
Discharge Time Constant	1.0 to 3.5 sec	1.0 to 3.5 sec	
Settling Time(within 10% of bias)	<3 sec	<3 sec	
Spectral Noise(1 Hz)	800 µg/√Hz	7840 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]
Spectral Noise(10 Hz)	250 µg/√Hz	2450 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]
Spectral Noise(100 Hz)	60 µg/√Hz	590 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]
Spectral Noise(1 kHz)	50 µg/√Hz	490 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]
Spectral Noise(10 kHz)	40 µg/√Hz	392 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]
Electrical Isolation(Base)	>10 <sup>8</sup> Ohm	>10 <sup>8</sup> Ohm	
<b>Physical</b>			
Size (Height x Length x Width)	0.14 in x 0.45 in x 0.25 in	3.6 mm x 11.4 mm x 6.4 mm	[1]
Weight	0.017 oz	0.5 gm	
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	Anodized Aluminum	Anodized Aluminum	
Sealing	Epoxy	Epoxy	
Electrical Connector	3-56 Coaxial Jack	3-56 Coaxial Jack	
Electrical Connection Position	Side	Side	
Mounting	Adhesive	Adhesive	

Typical Sensitivity Deviation vs Temperature

Temperature (°F)	Sensitivity Deviation (%)
-70	10
-30	5
10	0
50	-5
90	-10
130	-15
170	-20
210	-25
250	-30

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.  
 In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.  
 ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.



## A.2 HOJA DE DATOS PARA ANALIZADOR PHOTON+ DYNAMIC SIGNAL ANALYZER

### Inputs

<b>Analog Channels</b>	2 standard, expandable to 4 simultaneous channels. All have differential input with 1 MΩ impedance. Each input channel has overload detection before both the analog and digital anti-alias filters. Setup allows per channel selection of input voltage range (0.01 V, 0.1 V, 1 V, 10 V), transducer sensitivity, sensor type (for example, acceleration, force, pressure, etc.), and coupling selections for DC, AC (high-pass cutoff at 0.5 Hz) and CCLD
<b>Electronics</b>	Differential amplifier, programmable gain amplifier, anti-aliasing filters, and 24-bit analog-to-digital converter (ADC)
<b>Filtering</b>	An analog filter plus a 160 dB/octave linear-phase digital filter prevents aliasing and phase distortion
<b>Frequency Range</b>	Up to 84 kHz analysis frequency (192 k samples per second)
<b>Voltage Ranges</b>	±0.01, ±0.1, ±1.0, ±10 V
<b>Signal Conditioning</b>	Voltage or CCLD sensor power (2.4 mA, 22 Vpeak open circuit)
<b>Maximum Input</b>	±36 Vpeak without damage
<b>Resolution</b>	24-bit
<b>Dynamic Range</b>	115 dBfs two-tone test, 100 linear averages
<b>Accuracy</b>	±0.04 dB (1 kHz sine at full scale)
<b>Channel Match Amplitude</b>	Within ±0.04 dB
<b>Channel Match Phase</b>	±0.01 degree to 1 kHz ±0.2 degree to 21 kHz (from DC to 21 kHz, frequency response measurements, all inputs at full scale, linear average)
<b>Frequency Accuracy</b>	Within 0.01%

### Outputs

<b>Analog Channels</b>	Waveform source standard
<b>Electronics</b>	24-bit digital-to-analog converter (DAC) with analog and digital anti-imaging filters
<b>Filtering</b>	A 160 dB/octave digital filter plus an analog filter to prevent aliasing and phase distortion
<b>Frequency Range</b>	Up to 42 kHz output frequency (96 k samples per second)
<b>Voltage Ranges</b>	±10 Vpeak
<b>Resolution</b>	24 bit
<b>Dynamic Range</b>	110 dBfs
<b>Output Impedance</b>	50 Ω
<b>Maximum Current</b>	24 mA peak

### Hardware

<b>Enclosure</b>	Ruggedized case encloses low-noise input/output board with 32-bit floating point DSP processor
<b>Connectors</b>	BNC connectors for inputs Tachometer Waveform source (output) USB connector socket
<b>User Interface</b>	Two status LEDs, start/stop button
<b>Input Expansion</b>	From two to four total analog inputs using Hardware Activation code
<b>PC Requirements</b>	USB port compliant with USB specifications 2.0 and supplies 500 mA Microsoft® Windows® XP (32-bit), Windows® 7 (32- and 64-bit), Windows® 8, 8.1 and 10 operating systems Microsoft® Word 2003, 2007, 2010, 2013 or 2016
<b>PC Expansion</b>	PC upgrades and peripheral additions do not delay or interrupt data acquisition and real-time processing
<b>Power</b>	Powered from PC with 5 V DC
<b>Power Consumption</b>	Less than 2.5 W
<b>Dimensions</b>	Height: 2.8 cm (1.1 in) Width: 9.9 cm (3.9 in) Depth: 12.1 cm (4.8 in)
<b>Weight</b>	227 g (8.0 oz)
<b>Temperature</b>	5 to 45 °C (41 to 113 °F)
<b>Humidity</b>	10% to 90% RH non-condensing

### Software

<b>Architecture</b>	All signal processing done in DSP Distributed processing relieves the PC from the burden of real-time processing. True multi-tasking allows the PC to deliver maximum graphics performance and responsiveness. The software provides on-line test status and management through text displays, software toggle buttons and screen displays of multiple time and/or frequency signals
<b>Applications</b>	Signal Analysis and Waveform Source; Modal Data Acquisition; Acoustic Analysis; Real-time Order Tracking; Transient Capture and SRS Analysis; Automatic Pass/Fail Testing; Swept-sine Measurement; Waveform Recording; Data Recording; and Re-calibration
<b>Features</b>	Online help; Consistent management of user-defined engineering units; single-click reporting with online graphics and test documentation of both setup parameters and signals through Microsoft® Word (saved on disk and/or printed)

### Regulatory Compliance

<b>Compliance</b>	CE marking
<b>Safety</b>	EN/IEC 60950-1
<b>EMC</b>	FCC Part 15 (CFR 47) Class A, EN 61326 Class A, CISPR 22 Class A

## A.3 HOJA DE DATOS PARA EL VIBRÓMETRO DIGITAL PDV-100

<b>i</b> <b>Metrological Specifications</b>			
Decoder type	Digital velocity decoder, 3 measurement ranges		
Frequency range	0.5 Hz - 22 kHz		
Measurement range (mm/s/V)	5	25	125
Full scale output (peak, mm/s)	20	100	500
Velocity resolution <sup>1</sup> ( $\mu\text{m s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	<0.02	<0.02	<0.1
Analog output	Velocity, $\pm 4$ V, 24-bit DAC		
Connector	BNC		
Dynamic range <sup>2</sup>	>90 dB		
Calibration accuracy	$\pm 1$ % (20 Hz ... 22 kHz)		
Output impedance	50 $\Omega$		
Filters	Digital low pass filter (FIR type): 1 kHz, 5 kHz, 22 kHz ( $\pm 0.1$ dB), roll-off 120 dB/dec Analog high pass filter: 100 Hz (-3dB), roll-off 60 dB/dec		
<b>Optical Specifications</b>			
Laser type	Helium Neon (HeNe)		
Laser class	Class 2, < 1 mW output power, eye-safe		
Laser wavelength	633 nm, visible red laser beam		
Focus	Manual		
Stand-off distance <sup>3</sup>	90 mm ... ~ 30 m		
Visibility maxima	96 mm + n · 138 mm; n = 0, 1, 2, 3, ...		
<b>General Specifications</b>			
Operating temperature	+5 ... +40 °C (41 °F...104 °F)		
Relative humidity	max. 80 %, non-condensing		
Dimensions L x W x H	300 mm x 64 mm x 129 mm (11.8 in x 2.5 in x 5.1 in)		
Weight	2.6 kg		
Display	LCD, 3-line, with background lighting		
Protection class	IP64 (dust and spray water protected)		
Power supply	11 V ... 14.5 V DC, max. 15 W or 100 ... 240 VAC $\pm 10$ %, 50/60 Hz with included AC/DC power supply		

<sup>1</sup> The resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0 dB in a 1 Hz spectral bandwidth (RBW), measured on 3M Scotchlite® tape.

<sup>2</sup> Defined as spurious free dynamic range (SFDR).

<sup>3</sup> The maximum stand-off distance depends on the surface properties of the object.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] A. Y. De Jesús Dávila, “Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible:,” *Análisis*, vol. 17, no. 1, p. 15, 2021.
- [2] European Union, “Worldwide Emission Standards and Related Regulations - Passenger Cars / Light and Medium Duty Vehicles,” *Continental: The Future in Motion*, vol. 1, no. May, p. 210 pages, 2019.
- [3] F. Ramirez-Hernández, “INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES Y COMPUESTOS DE EFECTO INVERNADERO,” tech. rep., INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO, may 2018.
- [4] John B Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. Massachusetts: McGraw-Hill series, 1988.
- [5] C. Liu, Q. Gao, Y. A. Jin, and W. Yang, “Application of wavelet packet transform in the knock detection of gasoline engines,” *IASP 10 - 2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, vol. 1, pp. 686–690, 2010.
- [6] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, vol. 53. PEARSON, 2013.
- [7] A. K. Oppenheim and A. L. Kuhl, “Energy loss from closed combustion systems,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 1, pp. 1257–1263, 2000.
- [8] J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble, and J. Warnatz, *Combustion*. Springer, 2006.

- 
- [9] F. Millo and C. V. Ferraro, “Knock in si engines: a comparison between different techniques for detection and control,” *SAE transactions*, pp. 1091–1112, 1998.
- [10] X. Zhen, Y. Wang, S. Xu, Y. Zhu, C. Tao, T. Xu, and M. Song, “The engine knock analysis—an overview,” *Applied Energy*, vol. 92, pp. 628–636, 2012.
- [11] M. Abu-Qudais, “Exhaust gas temperature for knock detection and control in spark ignition engine,” *Energy conversion and management*, vol. 37, no. 9, pp. 1383–1392, 1996.
- [12] B. Grandin and I. Denbratt, “The effect of knock on heat transfer in si engines,” *SAE transactions*, pp. 622–630, 2002.
- [13] M. Ettefagh, M. Sadeghi, V. Pirouzpanah, and H. A. Tash, “Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block: A parametric modeling approach,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, no. 6, pp. 1495–1514, 2008.
- [14] K. Reif, “Gasoline engine management,” *Bosch Professional Automotive Information, DOI*, vol. 10, pp. 978–3, 2015.
- [15] J. Ängeby, A. Johnsson, and K. Hellström, “Knock detection using multiple indicators and a classification approach,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 31, pp. 297–302, 2018.
- [16] C. Liu, Q. Gao, Y.-a. Jin, and W. Yang, “Application of wavelet packet transform in the knock detection of gasoline engines,” in *2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, pp. 686–690, IEEE, 2010.
- [17] J. D. Naber, J. R. Blough, D. Frankowski, M. Goble, and J. E. Szpytman, “Analysis of combustion knock metrics in spark-ignition engines,” *SAE Transactions*, pp. 223–243, 2006.
- [18] M. Mosher, “Understanding vibration spectra of planetary gear systems for fault detection,” in *International Design Engineering Technical Conferences and*

- Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 37025, pp. 645–652, 2003.
- [19] J. Flett and G. M. Bone, “Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 72, pp. 316–327, 2016.
- [20] A. Zabihi-Hesari, S. Ansari-Rad, F. A. Shirazi, and M. Ayati, “Fault detection and diagnosis of a 12-cylinder trainset diesel engine based on vibration signature analysis and neural network,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, no. 6, pp. 1910–1923, 2019.
- [21] O. Boubai, “Knock detection in automobile engines,” *IEEE instrumentation & measurement magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 24–28, 2000.
- [22] R. Stone, *Introduction to internal combustion engines*, vol. 3. Springer, 1999.
- [23] Z. Wang, H. Liu, and R. D. Reitz, “Knocking combustion in spark-ignition engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 61, pp. 78–112, 2017.
- [24] G. Kalghatgi, “Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?,” *Applied energy*, vol. 225, pp. 965–974, 2018.
- [25] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. H. Nawab, G. M. Hernández, *et al.*, *Signals & systems*. Pearson Educación, 1997.
- [26] T. Irvine, “An introduction to the vibration response spectrum,” *Revision D, Vibrationdata*, 2009.
- [27] M. J. Kearney, “Knock signal conditioning using the discrete fourier transform and variable detection window length,” tech. rep., Citeseer, 2007.
- [28] K. Shin and J. Hammond, *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. John Wiley & Sons, 2008.
- [29] A. V. Oppenheim, J. R. Buck, and R. W. Schafer, *Discrete-time signal processing. Vol. 2*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

- 
- [30] P. Gómez Gordo Villa, *Desarrollo de un sistema de control automático aplicado a un motor CFR para el estudio físico-químico de la combustión*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017.
- [31] G. Rubio Gómez, *Estudio de la combustión de mezclas de gasolina-bioalcohol en un motor de compresión variable CFR*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.
- [32] S. A. D2700-16a, *Standard test method for motor octane number of spark-ignition engine fuel*. No. West Conshohocken PA in 16a, ASTM International, 2016.
- [33] L. Corral-Gómez, G. Rubio-Gomez, D. Rodriguez-Rosa, A. Martín-Parra, D. de la Rosa-Urbalejo, and S. Martínez-Martínez, “A comparative analysis of knock severity in a cooperative fuel research engine using binary gasoline–alcohol blends,” *International Journal of Engine Research*, vol. 22, no. 6, pp. 1997–2009, 2021.
- [34] G. Manhertz and A. Antal, “The effect of air-fuel equivalence ratio change on the vibration components of an internal-combustion engine,” *Recent Innovations in Mechatronics*, vol. 2, no. 1-2., pp. 1–6, 2015.
- [35] G. Rubio-Gómez, L. Corral-Gómez, D. Rodriguez-Rosa, F. A. Sánchez-Cruz, and S. Martínez-Martínez, “A comparative study of the effect of compression ratio on the efficiency and flame development angle in a cooperative fuel research engine fueled with binary gasoline–alcohol blends,” *International Journal of Engine Research*, vol. 22, no. 2, pp. 569–580, 2021.
- [36] F. Bi, T. Ma, and X. Wang, “Development of a novel knock characteristic detection method for gasoline engines based on wavelet-denoising and EMD decomposition,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 117, pp. 517–536, 2019.

- 
- [37] V. K. Antonio Joseph and G. Kumaran Thampi, “Power spectral estimation of engine block vibrations to classify and predict the occurrence of knock,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1114, no. 1, p. 012055, 2021.
- [38] N. Cavina, A. Businaro, M. De Cesare, F. Monti, and A. Cerofolini, “Application of acoustic and vibration-based knock detection techniques to a high speed engine,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2017.
- [39] J. C. P. Jones and S. Shayestehmanesh, “The statistical properties of raw knock signal time histories,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 156, p. 107660, 2021.
- [40] S. Delvecchio, P. Bonfiglio, and F. Pompoli, “Vibro-acoustic condition monitoring of internal combustion engines: A critical review of existing techniques,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 99, pp. 661–683, 2018.
- [41] C. Santana, J. Mautone, and H. Almeida, “Experimental analysis between performance parameters an internal combustion and engine block vibration with gasoline and ethanol fuel,” *Available at SSRN 3893532*, 2021.