

**ANÁLISIS Y DETECCIÓN DE FALLAS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA DE CUATRO CILINDROS MEDIANTE EL USO DE VIBRACIONES
MECÁNICAS Y ULTRASONIDO**

**EDWIN FERNEY QUINTERO RANGEL
JIMMY ALEXANDER SUAREZ VARGAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2013**

**ANÁLISIS Y DETECCIÓN DE FALLAS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA DE CUATRO CILINDROS MEDIANTE EL USO DE VIBRACIONES
MECÁNICAS Y ULTRASONIDO**

**EDWIN FERNEY QUINTERO RANGEL
JIMMY ALEXANDER SUAREZ VARGAS**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

MSc. Ingeniería Mecánica

Codirector

JAVIER MAURICIO CASTELLANOS OLARTE

MSc. Ingeniería Mecánica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIAS

Al creador de tan maravilloso juego de ajedrez que es la vida, por permitirme vivir tantos momentos felices y enseñarme a superar las dificultades.

A mis padres Wolmer Iván y Luz Marina por su amor, cariño, comprensión y apoyo incondicional, ya que gracias a ellos este objetivo se ha cumplido, y he conseguido formarme como profesional pero principalmente como persona.

A mi hermano Iván Sebastián por siempre estar hay pendiente, motivándome a seguir adelante y a mis hermanitas Zulay Katherine y María Elizabeth por brindarme sus sonrisas tiernas y llenas de amor, que me fortalecen y llenan de felicidad.

A mi familia en general por confiar siempre en mis capacidades, por animarme y por su inmenso cariño.

También les agradezco a mis amigos más cercanos, a esos amigos con los que siempre he contado en las buenas y en las malas.

Edwín Ferney Quintero Rangel

DEDICATORIAS

Al Universo, por permitirme hacer parte de él.

A mi padre Jaime Suárez por ser el más maravilloso que he conocido, por enseñarme de sus valores y virtudes, por su apoyo incondicional, a mi madre Smith Vargas, por su comprensión, cariño, apoyo y paciencia.

A mi hermana Shirley Suárez por brindarme su confianza y alegría, su hermandad y afecto.

A mi Tío Arnulfo por su confianza y apoyo.

A mis amigos Randol Rincón Fadul, Cristian Becerra y Sergio Navarro, por brindarme su amistad, por compartir momentos muy especiales, porque más que mis amigos, son mis hermanos.

A mi amigo Edwin Quintero por permitirme hacer parte de su gran logro.

A todos aquellos familiares, amigos, docentes, compañeros que estuvieron pendientes en mi proceso de formación como profesional.

Y finalmente a un hombre de carácter, pero con un humor lleno de vida, que sin él, estas letras no hubieran sido posibles, mi abuelo Samuel Suárez.

Jimmy Alexander Suárez Vargas

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestros agradecimientos a:

Al MSc. Jabid Quiroga por brindarnos su confianza, colaboración y asesoría para poder alcanzar esta meta.

Al MSc. Javier Mauricio Castellanos por brindarnos su confianza, por su paciencia y colaboración incondicional durante el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por facilitarnos sus laboratorios y la disponibilidad de sus trabajadores.

A todos los profesores de la escuela de ingeniería mecánica que estuvieron dispuestos a Compartir su conocimiento y a formarnos como profesionales y especialmente como personas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	24
1.1. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	24
2. BANCO USADO PARA LAS PRUEBAS	26
2.1. MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	27
2.2. SENSOR DE PRESIÓN	28
2.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	28
2.4. ACELERÓMETROS	29
2.5. SENSOR DE ULTRASONIDO	29
2.6. TERMOCUPLAS TIPO K	30
2.7. SENSOR DE PROXIMIDAD	30
2.8. MULTÍMETRO	31
2.9. AMPLIFICADOR DE SEÑAL	31
2.10. LECTOR DE TERMOCUPLAS Y FUNTE DE 24 V	32
2.11. OSCILOSCOPIO	32
2.12. ESQUEMA DEL BANCO EXPERIMENTAL	34
3. UBICACIÓN DE LOS SENSORES UTILIZADOS	35
4. FALLAS A DETECTAR EN EL MOTOR USANDO ANALISIS DE VIBRACIONES Y ULTRASONIDO	36
5. CONSIDERACIONES GENERALES PARA LAS PRUEBAS	37
5.1. MONTAJE DE LOS SENSORES	37
5.1.1. Montaje de los acelerómetros y del sensor de ultrasonido	37
5.1.2. Montaje de las termocuplas	37
5.1.3. Montaje del sensor de presión	38
5.1.4. Montaje del proximito	38
5.2. TEMPERATURA DEL MOTOR	39
5.3. REGIMEN DEL MOTOR	39
5.4. DIRECCIÓN DE LAS MEDICIONES	40

6.	ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS	40
6.1.	DISEÑO DE LAS PRUEBAS	40
6.1.1.	Tiempo de duración de las pruebas	41
6.1.2.	Secuencia de las pruebas	41
6.2.	CALIBRACIÓN Y SENSIBILIDAD DE LOS SENSORES	41
6.3.	CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES ADQUIRIDAS	42
6.3.1.	Rango de frecuencia	42
6.3.2.	Nivel de vibración	42
6.3.3.	Unidades de medición	42
6.4.	PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES ADQUIRIDAS	43
6.4.1.	Procesamiento de las señales de vibración mecánica	43
6.4.1.1.	Aplicación de ganancias	43
6.4.1.2.	Filtrado de la señal	43
6.4.2.	Procesamiento de las señales de ultrasonido	44
7.	SEÑALES DE REFERENCIA EN CONDICIÓN NORMAL	45
7.1.	SEÑALES DE BUEN FUNCIONAMIENTO A 1250 RPM	45
7.2.	SEÑALES DE BUEN FUNCIONAMIENTO A 2000 RPM	48
7.3.	METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA CARACTERIZACIÓN	50
8.	FALLA POR MAL FUNCIONAMIENTO EN LAS BUJÍAS	51
8.1.	PRINCIPIOS TEÓRICOS	51
8.2.	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	54
8.2.1.	Inducción de la falla	54
8.2.2.	Señales adquiridas	55
8.2.2.1.	Señales a 1250 rpm	56
8.2.2.2.	Señales a 2000 rpm	59
8.2.2.3.	Resultados en el dominio de la frecuencia	62
8.2.3.	Análisis de resultados y caracterización de la falla	65
9.	FALLA POR OBSTRUCCIÓN EN LAS LINEAS DE SUCCIÓN Y DE DESCARGA	68
9.1.	PRINCIPIOS TEÓRICOS	68

9.2.	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	70
9.2.1.	Inducción de la falla por obstrucción en la línea de succión	70
9.2.2.	Señales adquiridas	71
9.2.3.	Análisis de resultados y caracterización de la falla	75
9.2.4.	Inducción de la falla por obstrucción en la línea de descarga	77
9.2.5.	Señales adquiridas	79
9.2.6.	Análisis de resultados y caracterización de la falla	82
10.	FALLA POR ADELANTO EN EL ENCENDIDO DE LA MEZCLA	84
10.1.	PRINCIPIOS TEÓRICOS	84
10.2.	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	86
10.2.1.	Inducción de la falla por adelanto en el encendido	86
10.2.2.	Señales adquiridas	87
10.2.2.1.	Señales a 1250 rpm	87
10.2.2.2.	Señales a 2000 rpm	91
10.2.3.	Análisis de resultados y caracterización de la falla	93
11.	FALLA POR DESCALIBRACIÓN EN LA APERTURA DE LAS VÁLVULAS DE ADMISION Y ESCAPE	96
11.1.	PRINCIPIOS TEÓRICOS	96
11.2.	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	97
11.2.1.	Inducción de la falla por descalibración en válvulas de admisión	97
11.2.2.	Señales adquiridas	99
11.2.3.	Análisis de resultados y caracterización de la falla	105
11.2.4.	Inducción de la falla por descalibración de válvulas de escape	108
11.2.5.	Señales adquiridas	110
11.2.6.	Análisis de resultados y caracterización de la falla	116
12.	CONCLUSIONES	120
12.	OBSERVACIONE Y RECOMENDACIONES	120
	BIBLIOGRAFÍA	124

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Partes de un motor de combustión interna.	25
Figura 2. Diagrama general del banco de pruebas.	26
Figura 3. Motor de combustión interna.	27
Figura 4. Sensor Piezoeléctrico.	28
Figura 5. Sistema de adquisición de datos.	13
Figura 6. Acelerómetros.	29
Figura 7. Sensor de ultrasonido.	29
Figura 8. Termocuplas.	30
Figura 9. Sensor de proximidad y proximitor.	30
Figura 10. Multímetro.	31
Figura 11. Amplificador de señal.	31
Figura 12. Lector de termocuplas.	38
Figura 13. Osciloscopio RIGOL DS1102E.	38
Figura 14. Esquema del banco experimental.	33
Figura 15. Ubicación de los sensores 1.	34
Figura 16. Ubicación de los sensores 2.	35
Figura 17. Montaje del proximitor.	38
Figura 18. Patrón de vibración vertical 1250 rpm.	45
Figura 19. Patrón de vibración horizontal 1250 rpm.	46
Figura 20. Patrón de ultrasonido 1250 rpm.	46
Figura 21. Patrón de presión 1250 rpm.	47
Figura 22. Patrón de vibración vertical 2000 rpm.	48
Figura 23. Patrón de vibración horizontal 2000 rpm.	48
Figura 24. Patrón de ultrasonido 2000 rpm.	49
Figura 25. Patrón de presión 2000 rpm.	49
Figura 26. Bujía nueva.	51

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 27. Fallas frecuentes en las bujías.	52
Figura 28. Bujía 3 desconectada.	54
Figura 29. V.V. Bujía 1,2,3 y 4 desconectada respectivamente 1250 rpm.	55
Figura 30. V.H. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 1250 rpm.	56
Figura 31. S.U. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 1250 rpm.	57
Figura 32. S. Presión: Bujías 4 desconectada a 1250 rpm.	58
Figura 33. V.V. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 2000 rpm	59
Figura 34. V.H. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 2000 rpm.	60
Figura 35. S. Presión: Bujía 4 desconectada 2000 rpm.	61
Figura 36. Espectro de buen funcionamiento V.V. 1250 rpm.	62
Figura 37. Espectro de buen funcionamiento V.V. 2000 rpm.	62
Figura 38. V.V. Espectro bujía 1 desconectada 1250 rpm.	63
Figura 39. V.V. Espectro bujía 4 desconectada 1250 rpm.	63
Figura 40. V.V. Espectro bujía 1 desconectada 2000 rpm.	64
Figura 41. V.V. Espectro bujía 4 desconectada 2000 rpm.	64
Figura 42. Diagramas PV, con y sin obstrucción en la succión.	69
Figura 43. Inducción de la falla mediante obstrucción en la succión.	70
Figura 44. V.V. Obstrucción en la succión 50% y 75% 1250 rpm.	71
Figura 45. S.U. Obstrucción en la succión 50% y 75% 1250 rpm.	72
Figura 46. S.U. Obstrucción en la succión 50% y 75% 2000 rpm.	73
Figura 47. S. Presión: Obstrucción en la succión 75% 1250 rpm.	74
Figura 48. S. Presión: Obstrucción en la succión 75% 2000 rpm.	75
Figura 49. Inducción de la falla mediante obstrucción de la descarga.	77
Figura 50. V.V Obstrucción en la descarga 50% y 75 % 1250 rpm.	78
Figura 51. S.U. Obstrucción en la descarga 50% y 75 % 1250 rpm.	79
Figura 52. S.U. Obstrucción en la descarga 50% y 75% 2000 rpm.	80
Figura 53 S. Presión: Obstrucción en la descarga 75% 1250 rpm.	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 54. S. Presión. Obstrucción en la descarga 75% 2000 rpm.	81
Figura 55. Diagramas para encendido normal y encendido adelantado.	85
Figura 56. Inducción de la falla mediante giro de la bobina de encendido.	86
Figura 57. V.V. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm.	87
Figura 58. V.H. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm	88
Figura 59. S.U. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm.	89
Figura 60. S. Presión. Adelanto del encendido $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm.	90
Figura 61. V.V Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 2000 rpm.	91
Figura 62. V.H. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 2000 rpm.	92
Figura 63. S. Presión. Adelanto del encendido $\theta_2 = 25^\circ$ a 2000 rpm.	93
Figura 64. Detección de válvulas de escape ligeramente descalibradas.	93
Figura 65. Inducción de la falla descalibración de válvula 2 de admisión.	97
Figura 66. V.V. Válvulas1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 1250 rpm.	99
Figura 67. V.H. Válvulas1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 1250 rpm.	100
Figura 68. V.V. Válvulas1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 2000 rpm.	101
Figura 69. V.H. Válvulas1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 2000 rpm.	102
Figura 70. S.U. Válvulas 1,2,3 y 4 de admisión descalibrada a 1250 rpm.	103
Figura 71. S. Presión: Válvula 4 de admisión descalibrada a 1250 rpm.	104
Figura 72. . S. Presión: Válvula 4 de admisión descalibrada a 2000 rpm.	104
Figura 73. Inducción de falla descalibración de una válvula de escape.	108
Figura 74. Inducción de falla descalibración de una válvula de escape.	109
Figura 75. V.V. Válvulas1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 1250 rpm.	110
Figura 76. V.H. Válvulas1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 1250 rpm.	111
Figura 77. V.V. Válvulas1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 2000 rpm.	112
Figura 78. V.H. Válvulas1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 2000 rpm.	113
Figura 79. S.U. Válvula 1 de escape descalibrada a 1250 rpm.	114

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 80. S. Presión: Válvula 4 de escape descalibrada a 1250 rpm.	115
Figura 81. S. Presión. Válvula 4 de escape descalibrada a 2000 rpm.	115

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características técnicas del motor de combustión.	27
Tabla 2. Temperaturas de buen funcionamiento a 1250 rpm.	47
Tabla 3. Temperaturas de buen funcionamiento a 2000 rpm.	58
Tabla 4. Temperaturas de las pruebas de bujías a 1250 rpm.	58
Tabla 5. Temperaturas de las pruebas de bujías a 2000 rpm.	61
Tabla 6. Temperaturas de las pruebas de obstrucción en la succión.	75
Tabla 7. Temperatura de las pruebas de obstrucción en la descarga	82
Tabla 8. Temperaturas de las pruebas de adelanto en el encendido.	93
Tabla 9. Temperaturas: pruebas de descalibración de válvulas de admisión	105
Tabla10. Temperaturas: pruebas de descalibración de válvulas de escape.	116

GLOSARIO

A

Acelerómetro: Denominado acelerómetro piezoeléctrico, es uno de los transductores más versátiles, se basa en que, cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada.

B

Biela: Se denomina biela a un elemento mecánico que sometido a esfuerzos de tracción o compresión, transmite el movimiento articulando a otras partes de la máquina. En un motor de combustión interna conectan el pistón a la manivela la cual va unida al cigüeñal.

Bujía: La bujía es el elemento que produce el encendido de la mezcla de combustible y aire en el (o los) cilindros, mediante una chispa, en un motor de combustión interna de encendido provocado (MEP) , tanto alternativo de ciclo Otto como Wankel. Su correcto funcionamiento es crucial para el buen desarrollo del proceso de combustión/expansión del ciclo Otto, ya sea de 2 tiempos (2T) como de cuatro (4T) y pertenece al sistema de encendido del motor.

C

Cárter: El cárter es una de las piezas fundamentales de una máquina, especialmente un motor. Técnicamente, el cárter es una caja metálica que aloja los mecanismos operativos del motor. Es el elemento que cierra el bloque, de forma estanca, por la parte inferior, y que cumple adicionalmente con la función de actuar como depósito para el aceite del motor. Simultáneamente, este aceite se refrigera al ceder calor al exterior.

Cavitación: La cavitación o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli (Principio de Bernoulli). Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, cavidades.

Cigüeñal: Es un eje acodado, con codos y contrapesos presente en ciertas máquinas que, aplicando el principio del mecanismo de biela- manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa.

D

Deyector: Aparato para evitar las incrustaciones que se producen en las calderas de vapor.

I

Ignición: La ignición ocurre cuando el calor que emite una reacción llega a ser suficiente como para sostener la reacción química.

L

LabVIEW: Es un entorno de programación gráfica usado por miles de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. Ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual. La plataforma LabVIEW es escalable a través de múltiples objetivos y sistemas operativos, desde su introducción en 1986 se ha vuelto un líder en la industria.

P

Pirómetro: Un pirómetro es un dispositivo capaz de medir la temperatura de una sustancia sin necesidad de estar en contacto con ella.

S

SAE: (Society of Automotive Engineers) formalmente Sociedad de Ingenieros de Automoción; es la organización enfocada en la movilidad de los profesionales en la ingeniería aeroespacial, automoción, y todas las industrias comerciales especializadas en la construcción de los vehículos.

Strain gauge: Traducido al español (galga extensiométrica) es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica.

V

Vástago: Barra o varilla metálica que sirve para unir o sostener otras piezas o transmitir un movimiento a un mecanismo: el vástago une el émbolo a la biela del motor.

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS Y DETECCIÓN DE FALLAS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO CILINDROS MEDIANTE EL USO DE VIBRACIONES MECÁNICAS Y ULTRASONIDO*

AUTORES: EDWIN FERNEY QUINTERO RANGEL
JIMMY ALEXANDER SUAREZ VARGAS**

PALABRAS CLAVES: Vibraciones mecánicas, motor de combustión interna, detección de fallas, ultrasonido.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto se desarrolló con el objeto de contribuir al desarrollo de la industria nacional en el campo del mantenimiento predictivo y más específicamente en el análisis de señales de vibración y ultrasonido en máquinas recíprocas, participando activamente en los procesos de cambio para el progreso, dando continuidad a la misión de la Universidad Industrial de Santander.

Este trabajo de grado pretende determinar la condición actual de un motor de combustión interna de cuatro cilindros, mediante el análisis de las señales de vibración y ultrasonido de éste, específicamente en relación a las siguientes fallas: mal funcionamiento de las bujías, obstrucción en las líneas de succión y de descarga, adelanto en el encendido de la mezcla y descalibración en la apertura de válvulas. Para lo cual, se realizó la caracterización de cada una de las fallas mencionadas, realizando pruebas de falla, captando diferentes tipos de señales y analizándolas con dicho propósito. Para el desarrollo de este proyecto se contó con un banco de pruebas acondicionado, el cual se encuentra ubicado en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y fue acondicionado con recursos de la División de Mantenimiento Tecnológico de la Universidad Industrial de Santander.

El indicador de falla corresponde a ciertas características de las señales de vibración y ultrasonido, diferentes a los patrones de buen funcionamiento; para especificar el tipo de falla, las señales obtenidas se deben comparar con los patrones de cada una de las fallas que han sido plenamente caracterizadas.

Se observó una gran coherencia entre lo expresado en la teoría y lo obtenido en la práctica, y se encontró que el análisis de vibraciones y ultrasonido son técnicas fundamentales para el monitoreo de la condición de los motores de combustión interna

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Msc. Javid Quiroga. Codirector: Msc. Javier Mauricio Castellanos.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS AND FAULT DETECTION IN A FOUR-CYLINDER INTERNAL COMBUSTION ENGINE USING MECHANICAL VIBRATION AND ULTRASONIC*

AUTHORS: EDWIN FERNEY QUINTERO RANGEL
JIMMY ALEXANDER SUAREZ VARGAS**

KEY WORDS: Mechanical vibration, internal combustion engine, fault detection, ultrasound.

DESCRIPTION:

This project was developed with the aim of contributing to the development of the national industry in the field of predictive maintenance and more specifically in the vibration and ultrasonic analysis on reciprocating machines, participating actively in the processes of change for progress, continuing the Industrial University of Santander mission.

This work also aims to determine the current condition of an internal-combustion, four-cylinder engine, by analyzing the vibration and ultrasonic signals of it, specifically in relation to the following failures: spark plugs malfunction, obstruction in the suction or discharge lines, the ignition advance and descalibration in the valve opening. For which, we performed the characterization of each of the mentioned faults, performing fault tests, capturing different types of signals and analyzing them for this purpose. For the development of this project we have had an equipped testing bank, which is located in Pontificia Bolivariana University of Bucaramanga and it was conditioned with funds from the Division of Maintenance Technology of the Industrial Santander University.

Fault indicator corresponds to certain characteristics on the vibration and ultrasonic signals, different from good operation patterns; to specify the type of failure, the obtained signals should be compared with each of the fault patterns that have been fully characterized.

Strong coherence between the theory and practice was visualized, and it can be concluded that the vibration and ultrasonic analysis are essential techniques for monitoring the condition of internal combustion engines.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Mechanical Engineering School. Director: Msc. Jabid Quiroga. Codirector: Msc. Javier Mauricio Castellanos.

INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna han sido a través de la historia, máquinas térmicas muy importantes, ya que mediante éstos se puede obtener energía mecánica directamente de la energía química generada durante la combustión. Hoy en día, estas máquinas se utilizan en gran variedad de industrias y básicamente en dos áreas: motores para automoción y motores estacionarios. Los motores para automoción incluyen transporte por carretera, maquinaria agrícola, propulsión ferroviaria, propulsión marina, maquinaria del sector minero y de la construcción; mientras que los motores estacionarios se utilizan principalmente como generadores de energía eléctrica, accionamiento industrial y agrícola.

Desde el punto de vista industrial, la falla imprevista de un motor de combustión interna puede ocasionar graves inconvenientes como por ejemplo, la parada de una línea de producción o retrasos en la ejecución de trabajos y contratos por el paro de maquinaria, entre otros. Por lo tanto, se hace indispensable contar con un buen plan de mantenimiento para monitoreo de los motores. En la actualidad, se emplean diferentes tipos de mantenimiento como son: mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento predictivo; siendo este último la tendencia a nivel industrial, ya que permite el monitoreo de las máquinas en operación.

Los programas de mantenimiento predictivo utilizan principalmente las técnicas de análisis y monitoreo de señales de vibración y ultrasonido, con el fin de establecer cuál es el estado de las máquinas. Estas técnicas serán utilizadas a lo largo de éste proyecto para caracterizar las siguientes fallas: mal funcionamiento de las bujías, obstrucción en las líneas de succión y de descarga, adelanto en el encendido de la mezcla, y descalibración en la apertura de válvulas de admisión y de escape.

Para la detección de fallas en máquinas recíprocas mediante las técnicas de vibraciones mecánicas y ultrasonido, comúnmente se emplea un análisis de las señales de vibración en el dominio del tiempo. Esto debido a que por la alta complejidad de sus señales, un análisis en el dominio de la frecuencia no muestra resultados confiables. El análisis en el dominio del tiempo busca realizar una caracterización de las diferentes señales en función del tiempo y más específicamente en función de la posición dentro del ciclo de rotación de la máquina; con el fin de detectar variaciones en las señales que sean representativas de falla, tres de los cuatro patrones de falla analizados fueron detectados claramente.

Para realizar la caracterización de las fallas y demostrar la capacidad de detección de éstas, se contó con un banco de pruebas dedicado para este tipo de estudios. Este banco fue desarrollado a partir del banco de un motor de combustión interna disponible en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y equipado para este estudio por medio de recursos de la División de Mantenimiento Tecnológico (DMT) de la Universidad Industrial de Santander.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

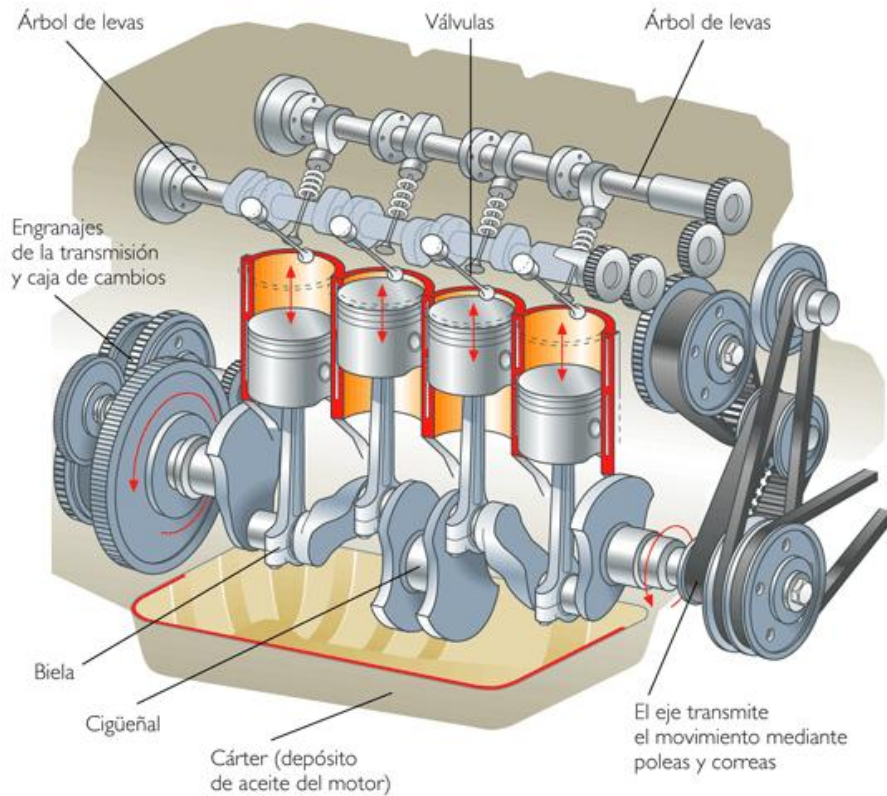
1.1. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Actualmente, el motor de combustión interna es una máquina térmica alternativa utilizada en gran número de aplicaciones industriales y automovilísticas, debido fundamentalmente a su gran capacidad de generar energía mecánica del proceso de combustión.

Las partes básicas de un motor de combustión interna son:

- **El bloque:** Es el elemento constitutivo del motor más voluminoso y pesado, su función es dar soporte a todo el conjunto móvil de piezas dentro del motor.
- **El cilindro:** Es la cavidad por la que el pistón se mueve hacia arriba y hacia abajo, ver la figura 1.
- **Los pistones:** Están hechos de aluminio en los motores pequeños y de fundición en motores grandes de baja velocidad.
- **Las bielas:** Éstas se encargan de convertir el movimiento rectilíneo del pistón en movimiento rotatorio al centro del cigüeñal por medio de los muñones de biela, ver la figura 1.
- **El cigüeñal:** Está constituido por un eje con semiejes excéntricos, sobre los que se apoyan las bielas.
- **Eje de levas:** Se fabrica de acero fundido o acero forjado con una leva por válvula, es usado para abrirlas y cerrarlas. Las superficies de las válvulas están endurecidas para obtener una vida útil adecuada.
- **La culata:** Es la tapa de los cilindros y está hecha de hierro fundido o aluminio. esta debe ser fuerte y rígida, para distribuir las fuerzas que los gases ejercen sobre ella, a través del bloque del motor
- **El cárter:** Es el elemento que cierra al bloque por la parte inferior, su forma cóncava aporta la capacidad de funcionar como depósito para el aceite del motor.

Figura 1. Partes de un motor de combustión interna.



Fuente: <http://tecnologia.escolapioslogrono.blogspot.com/2011/04/motor-de-combustion.html>

Los motores de combustión interna se clasifican por su principio de operación, por su ciclo de operación o por los métodos de ignición:

a) Por su principio de operación:

1. Motores rotativos
2. Motores reciprocantes

c) Por métodos de ignición:

1. Ignición por chispa (MICH)
2. Ignición por compresión (MIC)

b) Por sus ciclos de operación:

1. De 2 tiempos
2. De 4 tiempos

2. BANCO USADO PARA LAS PRUEBAS

Figura 2. Diagrama general del banco de pruebas.



Fuente. Los autores

El banco se encuentra en el laboratorio de transferencia de calor de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga (Salón I 202), ya que mediante un convenio con la Universidad Industrial de Santander se aprobó la colaboración para el desarrollo de este proyecto de grado en sus instalaciones. Este banco de pruebas se compone de los siguientes elementos:

2.1. MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Figura 3. Motor de combustión interna.



Fuente. Los autores

La Tabla 1 muestra las características técnicas del motor que se utilizó para la práctica:

Tabla 1. Características técnicas del motor de combustión.

MARCA	Mazda Motor Corporation
REFERENCIA	323
ALIMENTACIÓN	Atmosférica
CILINDRADA	1300 cc
Nº DE PISTONES	4
ARBOL DE LEVAS	SOHC
REFRIGERACIÓN	Agua
ORDEN DE ENCENDIDO	1 - 3 - 4 - 2
RELACIÓN DE COMPRESIÓN	9.7 : 1
REVOLUCIÓN DE RALENTI	950 ± 50 rpm
POTENCIA MÁXIMA NETA	49 KW @ 5200 rpm
PAR MOTOR MAXIMO NETO	99 N*m @ 3500 rpm

2.2. SENSOR DE PRESIÓN

Figura 4. Sensor Piezoeléctrico.



Fuente: <http://www.pcb.com/model=175A01photo>

2.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Figura 5. Sistema de adquisición de datos.



Fuente. Los autores

2.4. ACELERÓMETROS

Figura 6. Acelerómetros.



Fuente. http://www.pcb.com/press_releases/images/649A01_PR.jpg

2.5. SENSOR DE ULTRASONIDO

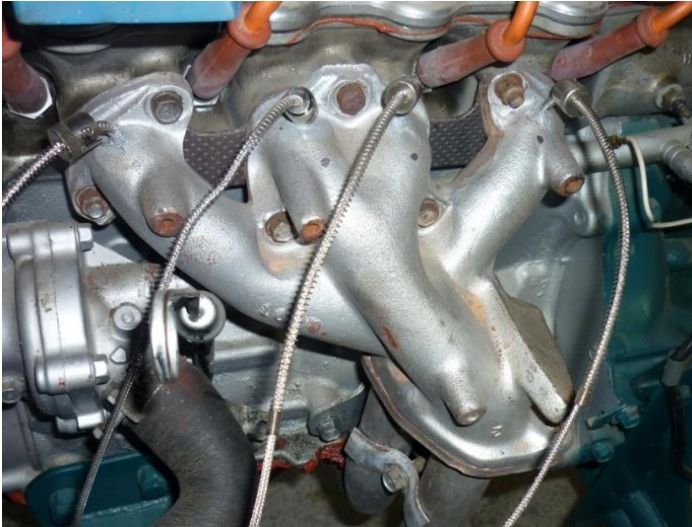
Figura 7. Sensor de ultrasonido.



Fuente. Los autores

2.6. TERMOCUPLAS TIPO K

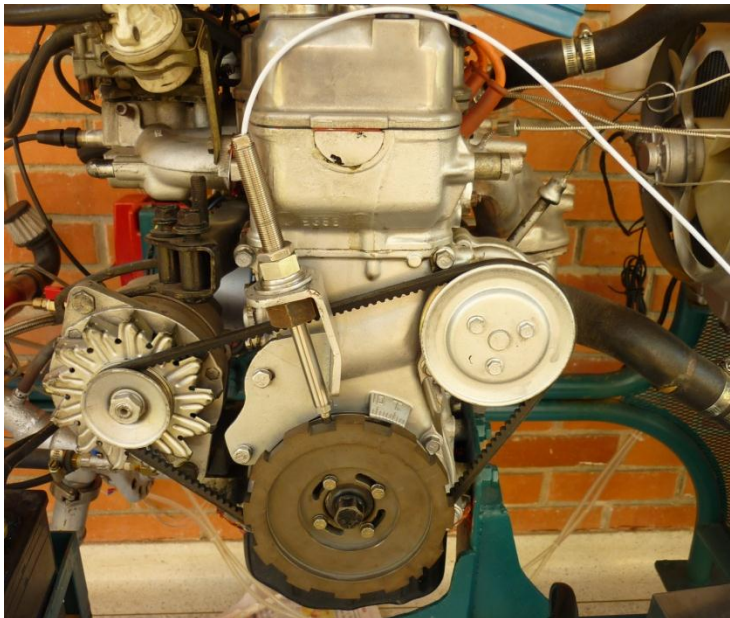
Figura 8. Termocuplas.



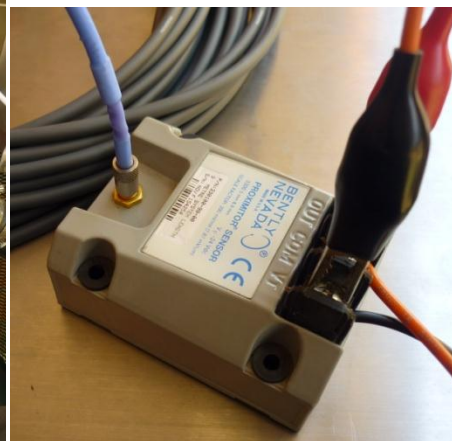
Fuente. Los autores

2.7. SENSOR DE PROXIMIDAD

Figura 9. Sensor de proximidad y proximito.



PROXIMITOR



Fuente. Los autores

2.8. MULTÍMETRO

Figura 10. Multímetro.



Fuente. Los autores

2.9. AMPLIFICADOR DE SEÑAL

Figura 11. Amplificador de señal.



Fuente. Los autores

2.10. LECTOR DE TERMOCUPLAS Y FUENTE DE 24 V

Figura 12. Lector de termocuplas.



Fuente. Los autores

2.11. OSCILOSCOPIO

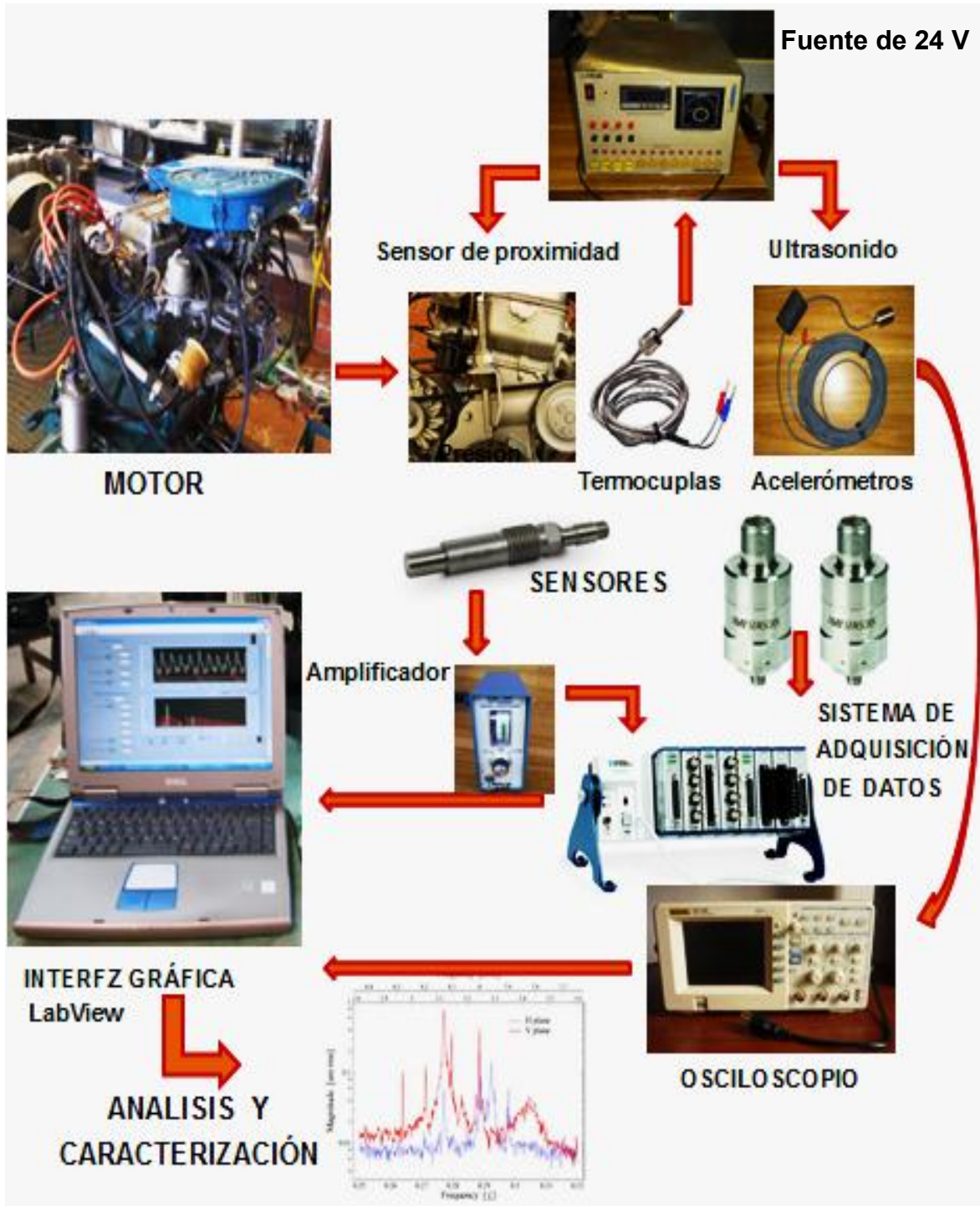
Figura 13. Osciloscopio RIGOL DS1102E.



Fuente. Los autores

2.12. ESQUEMA DEL BANCO EXPERIMENTAL

Figura 14. Esquema del banco experimental.



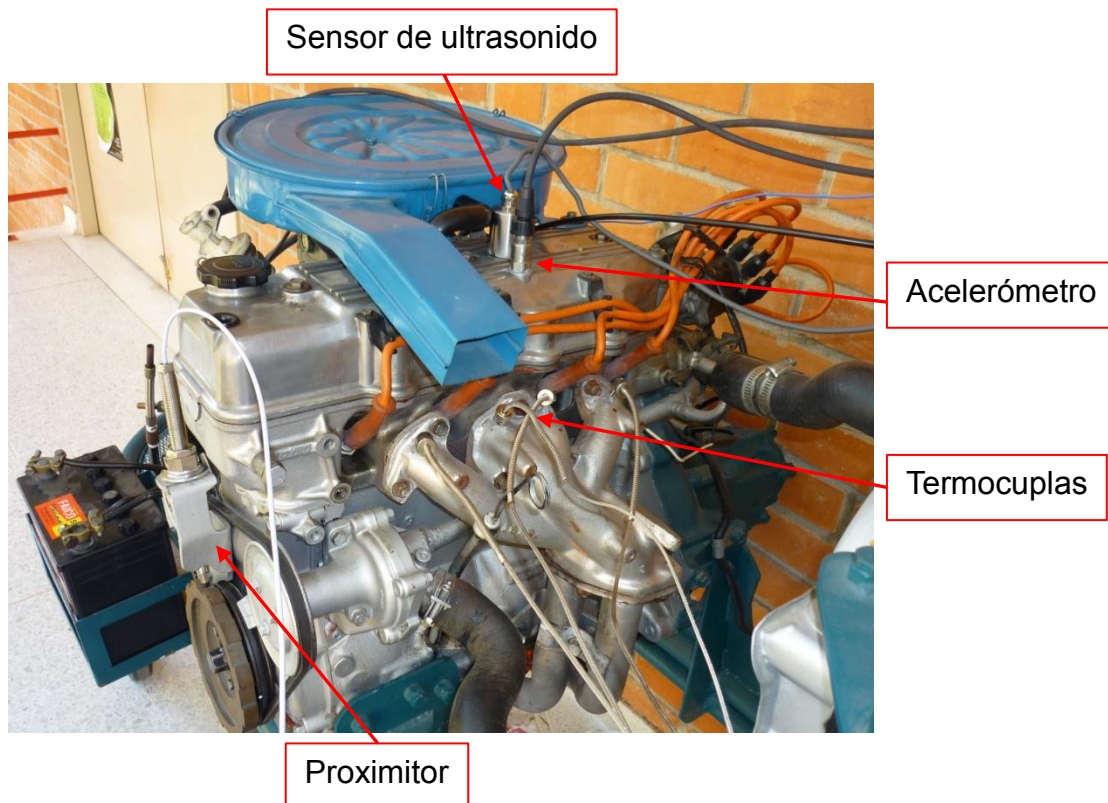
Fuente. Los autores

3. UBICACIÓN DE LOS SENSORES UTILIZADOS

Los sensores utilizados en el análisis y detección de fallas fueron:

- ✓ 2 sensores de vibraciones mecánicas (acelerómetros).
- ✓ 1 sensor de ultrasonido.
- ✓ 1 sensor de proximidad.
- ✓ 1 sensor de presión.
- ✓ 4 sensores de temperatura (termocuplas).

Figura 15. Ubicación de los sensores 1.

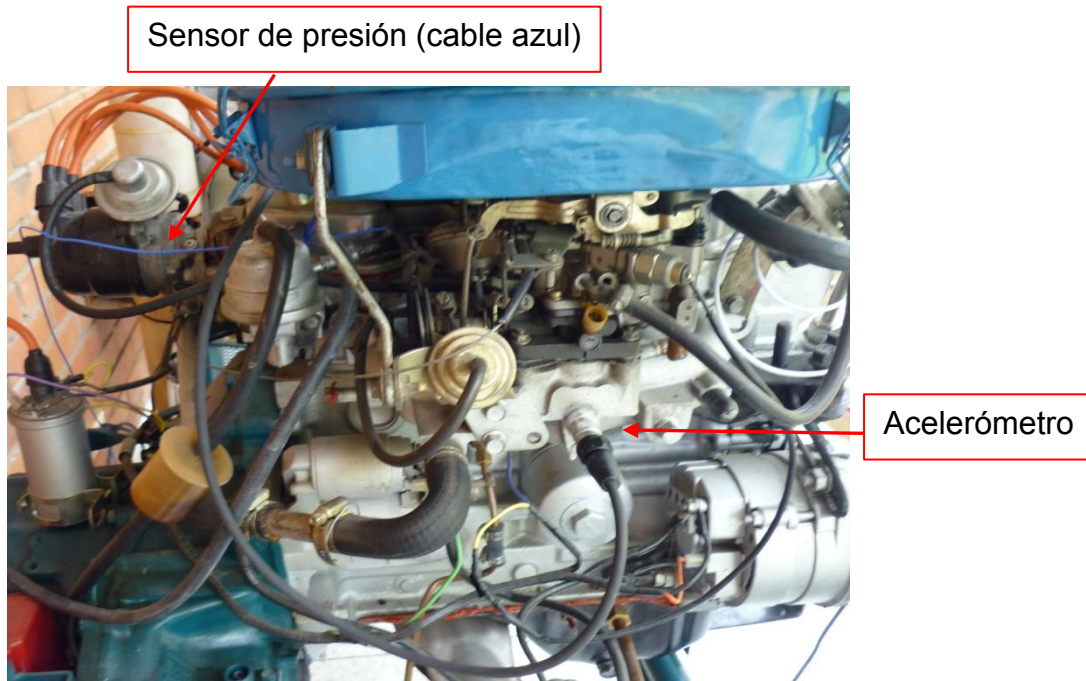


Fuente. Los autores

Los sensores de vibraciones mecánicas se encuentran ubicados uno sobre la tapa superior de la culata en dirección vertical y el otro bajo el carburador en posición horizontal; el sensor de ultrasonido se encuentra ubicado en la parte

superior del motor, junto al acelerómetro vertical; el proximito está localizado en la parte frontal cerca de la cremallera, el cual detecta los dientes de la rueda dentada acoplada al cigüeñal, permitiendo obtener una referencia de la posición angular del cigüeñal; y las termocuplas se encuentran ubicadas en los tubos del múltiple de escape, ver las figuras 15 y 16.

Figura 16. Ubicación de los sensores 2.



Fuente. Los autores

4. FALLAS A DETECTAR EN EL MOTOR USANDO ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y ULTRASONIDO

Las fallas que se buscan detectar corresponden a una mezcla de problemas tanto mecánicos como eléctricos, que representan las fallas que con mayor frecuencia se presentan en los motores de combustión interna, tales como:

FALLA POR MAL FUNCIONAMIENTO DE LAS BUJÍAS

FALLA POR OBSTRUCCIÓN EN LAS LINEAS DE SUCCIÓN Y DE DESCARGA

FALLA POR ADELANTO EN EL ENCENDIDO DE LA MEZCLA

FALLA POR DESCALIBRACIÓN EN LA APERTURA DE VÁLVULAS

Las pruebas se realizaron en el banco de pruebas del motor de combustión interna de cuatro cilindros encendido por chispa descrito anteriormente, que se encuentra en el laboratorio de transferencia de calor de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga (salón I 202).

5. CONSIDERACIONES GENERALES PARA LAS PRUEBAS

Para que los resultados de las mediciones realizadas con los diferentes sensores utilizados fueran representativos de las condiciones operativas del motor de combustión interna, se hicieron las consideraciones pertinentes a una medición dinámica, las cuales requieren tomar en consideración parámetros como: **El montaje de los sensores, temperatura del motor, régimen del motor, dirección de las mediciones.**

5.1. MONTAJE DE LOS SENSORES

5.1.1. Montaje de los acelerómetros y del sensor de ultrasonido

Con el propósito de obtener una buena señal tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia se optó por utilizar un pegante especial, resistente a altas temperaturas de operación, con lo cual se garantizó que los acelerómetros y sensor de ultrasonido quedaran firmemente conectados al motor en movimiento y de este modo obtener una señal proporcional a la variable por medir.

5.1.2. Montaje de las termocuplas

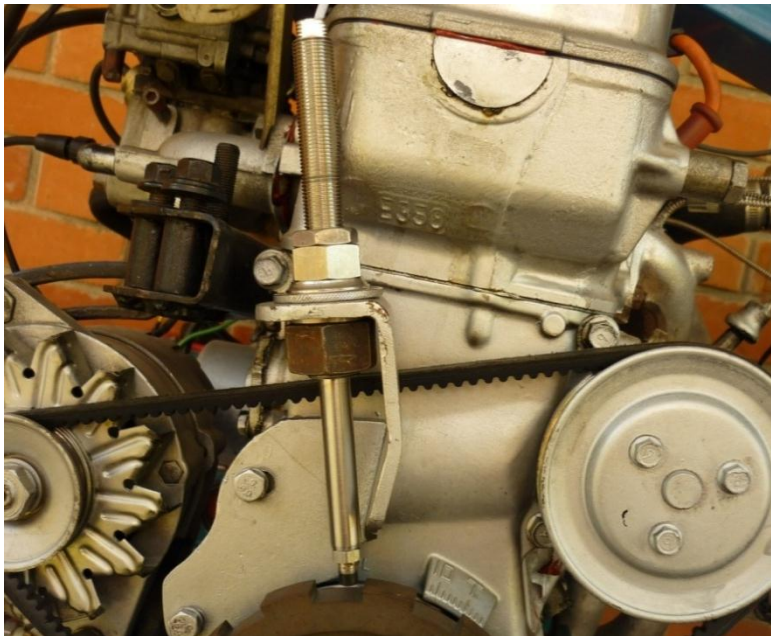
Las termocuplas se ubicaron en pequeños agujeros taladrados en el múltiple de escape y fueron establecidas fijamente mediante una silicona industrial resistente a altas temperaturas; de tal forma que se puede monitorear la temperatura de los gases de escape de cada uno de los cilindros y así contar con otra variable para detectar las fallas en un determinado cilindro.

5.1.3. Montaje del sensor de presión

El banco de pruebas utilizado ya contaba con la instalación del sensor de presión piezoeléctrico, el cual fue instalado en un proyecto de grado anterior cuyos autores fueron: Hernando Darío Jaimes y Pablo José Santis, ver bibliografía. Sin embargo, para la realización del montaje de este sensor, ellos realizaron el mecanizado de un hueco en el bloque del motor, de tal forma que la punta del sensor quedó dentro del cuarto cilindro realizando la respectiva toma de presión dentro de este cilindro en cualquier instante.

5.1.4. Montaje del proximito

Figura 17. Montaje del proximito.



Galgas de Calibración



Fuente. (a) Los autores

(b) http://www.kalkumezquerra.com/images/metrologia/Galgas_de_espesores_100_mm_.jpg

El banco de pruebas utilizado ya contaba con el montaje del sensor de proximidad capacitivo, ver la figura 17, el cual fue instalado en un proyecto de grado anterior cuyos autores fueron: Hernando Darío Jaimes y Pablo José Santis. Sin embargo,

para la realización del montaje de este sensor, ellos fabricaron la pieza soporte del sensor, la cual fue soldada al bloque del motor, además, la distancia del proximitor a la rueda dentada puede ser graduada mediante un mecanismo de tornillo y tuerca de ajuste, en la parte inferior cuenta con una tuerca de apriete para asegurar el sistema a la base y en la parte superior con una contratuerca para evitar su desajuste a causa de la vibración.

Ajuste del proximitor: El sensor de proximidad utilizado fue un sensor tipo capacitivo de la empresa Bently Nevada 3300 de 8mm de diámetro de cabeza, cuya capacidad de detección se limitaba a unas 20 centésimas de milímetro, por lo cual se tuvo que realizar un adecuado centrado de la rueda dentada y posterior ajuste del sensor lo más cercano posible, de tal forma que alcanzara a registrar una medida de voltaje, pero, evitando cuidadosamente que el sensor quedara chocando con la rueda dentada una vez puesto en funcionamiento; este ajuste se realizó utilizando galgas de calibración como se muestra en la figura 17.

5.2. TEMPERATURA DEL MOTOR

Considerando la alta temperatura que genera el motor durante su funcionamiento, se determinó que los sensores de vibración y ultrasonido debían estar ubicados sobre el motor, pero lo más alejado posible para evitar sobrecalentamiento. Además, se determinó realizar las pruebas una por una y en el menor tiempo posible, dejando enfriar el motor entre ellas, evitando así que las mediciones se distorsionen por efecto de la alta temperatura.

5.3. REGIMEN DEL MOTOR

Las pruebas fueron realizadas a bajo y alto régimen de velocidad del cigüeñal (1250 y 2000 rpm.) para ver si los resultados eran independientes de la velocidad

y observar el posible incremento del grado de severidad de la falla a altas velocidades.

5.4. DIRECCIÓN DE LAS MEDICIONES

La dirección seleccionada para la medición de la señal de ultrasonido fue la dirección vertical, paralela al eje de movimiento de los cilindros, ya que teóricamente en esta dirección son más importantes las vibraciones y sonidos producidos por las fuerzas recíprocas (de inercia y presión del gas). Por este mismo motivo, para la medición de las señales de vibración a través de los acelerómetros se seleccionó uno para medir en dirección vertical y otro en dirección horizontal, donde también se perciben grandes amplitudes de vibración.

6. ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Para la creación de la base de datos se utilizó la aplicación de LabView llamada LabView SignalExpress la cual es una herramienta de ingeniería muy útil, ya que permite la lectura y almacenamiento de datos directamente del sistema de adquisición de datos a través de un puerto USB. LabView SignalExpress además de guardar los datos en el computador, también cuenta con aplicaciones para su posterior procesamiento y análisis de datos, permitiendo obtener el espectro de la señal, realizar diferentes tipos de gráficas y visualizaciones, la aplicación de filtros, entre otras aplicaciones que se utilizaron en este proyecto.

6.1. DISEÑO DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se diseñaron teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, a partir de las cuales se establecieron los siguientes parámetros:

6.1.1. Tiempo de duración de las pruebas

- ✓ Tiempo de calentamiento del motor antes de iniciar la prueba: 2 minutos
- ✓ Tiempo de adquisición de datos: 5 minutos
- ✓ Tiempo de enfriamiento mínimo entre las pruebas: 10 minutos

6.1.2. Secuencia de las pruebas

El orden de las pruebas se diseñó de acuerdo a la facilidad de inducción de la falla, al igual que la facilidad para repararla una vez tomados los datos, evitando así las pérdidas de tiempo y el desajuste del motor en las demás pruebas, estableciendo la siguiente secuencia:

1. Prueba de buen funcionamiento.
2. Falla por mal funcionamiento de las bujías.
3. Falla por obstrucción en las líneas de succión y de descarga.
4. Falla por adelanto en el encendido de la mezcla.
5. Falla por descalibración de válvulas.

6.2. CALIBRACIÓN Y SENSIBILIDAD DE LOS SENSORES

Cada uno de los sensores utilizados cuenta con su respectivo certificado de calibración donde se garantiza el buen funcionamiento del aparato y se especifican sus características:

Sensibilidad de los acelerómetros: 103 mV/g (10,5 mV/m/s²)

Sensibilidad del sensor de ultrasonido: Frecuencia nominal 40 KHz

Sensibilidad del sensor de presión: 1.339 mV/PSI o 194.2 mV/Mpa

6.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES ADQUIRIDAS

6.3.1 Rango de frecuencia

Las señales de vibración mecánica fueron tomadas a través del sistema de adquisición de datos utilizado, el cual tiene una frecuencia de muestreo de 25000 Hz, permitiendo analizar las señales de vibración tanto a bajas como a altas frecuencias sin ningún problema. Por otro lado, para la adquisición de las señales de ultrasonido se empleó un osciloscopio, ya que la frecuencia nominal del sensor de ultrasonido era de 40 KHz y se requería de un equipo con una frecuencia de muestreo superior a los 40 KHz para poder realizar el análisis de la señal en las frecuencias cercanas a dicha frecuencia.

6.3.2. Nivel de vibración

Para valorar la intensidad o amplitud de la vibración se utilizó el valor eficaz o valor RMS, que toma en cuenta la historia de la señal de vibración en el tiempo y es una cantidad descriptiva que está relacionada a la potencia contenida en la vibración.

6.3.3. Unidades de medición

Basados en los certificados de calibración y la sensibilidad de cada uno de los sensores empleados, se realizó la conversión de escala adecuada, convirtiendo la señal de voltaje leída del sistema de adquisición de datos a las unidades correspondientes y más representativas del tipo de magnitud que se está midiendo. Las unidades que se adoptaron trabajar en este proyecto son:

- ✓ Aceleración: g (gravedad)
- ✓ Presión: Mpa.
- ✓ Señal de ultrasonido: mV
- ✓ Temperatura: °C
- ✓ Posición angular: Grados (°)

6.4. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES ADQUIRIDAS

6.4.1. Procesamiento de las señales de vibración mecánica

Algunas de las señales adquiridas tuvieron que ser acondicionadas antes de realizar su respectivo análisis, ya que se requería de la aplicación de ganancias, correspondientes a la sensibilidad de los sensores, para llevar las señales inicialmente en voltios a las respectivas unidades de estudio.

Además, según la documentación estudiada en la fase de investigación de este proyecto, los patrones de falla están presentes principalmente en las altas frecuencias de vibración, que normalmente son opacadas y ocultadas por los armónicos de baja frecuencia de las señales, por lo cual, se optó por la aplicación de un filtro de bajas frecuencias, permitiendo solo el paso de las altas frecuencias y mejorando la visualización de las señales. El software LabView SignalExpress dentro de sus herramientas permite realizar lo mencionado anteriormente. A continuación se describe las herramientas utilizadas para realizar el correspondiente procesamiento de señal:

6.4.1.1. Aplicación de ganancias

Se utilizó la herramienta Scaling and Conversion de las opciones de procesamiento de señales análogas del programa, se utilizó para el procesamiento de las señales de vibración tanto en dirección vertical como horizontal.

6.4.1.2. Filtrado de la señal

Se utilizó la herramienta Filter de las opciones de procesamiento de señales análogas, se empleó la configuración: Modo IIR Filter, Tipo Highpass, Topología Butterworth de Orden 2 y activación del filtro hasta los 1000 Hz.

6.4.1. Procesamiento de las señales de ultrasonido

Ya que las señales de ultrasonido fueron captadas a través del osciloscopio, el cual guardaba las señales en forma digital como una serie de puntos, en archivos formato CSV, estas tuvieron que ser procesadas de forma independiente, para lo cual, se empleó el software MATLAB y algunas de sus funciones particulares para el procesamiento de señales. A continuación se muestra el programa empleado para el estudio de las señales tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia. En este se aplica a la señal un filtro: Modo IIR Filter, Tipo Bandpass, Topología Butterworth de Orden 6 y con paso de la banda de frecuencias entre 38 y 42 KHz cerca de la frecuencia nominal del sensor.

```
%PROGRAMA PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES DE ULTRASONIDO

%Volt es el vector voltaje del sensor
%Second es vector tiempo correspondiente a Volt
%APLICACION DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER
L=length(Volt); %Longitud de la senal
t=Second(L)-Second(1); %Tiempo en segundos
Fs=(L-1)/t; %Frecuencia de muestreo
FNyq=Fs/2; %Frecuencia de Nyquist
NFFT=2^nextpow2(L); %La siguiente potencia de 2
Y=fft(Volt,NFFT)/L; %Se aplica la transformada de Fourier a la senal
f=Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); %Establece el eje de frecuencias
%plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1))) %GRAFICA DEL ESPECTRO DE LA SEÑAL
%title('ESPECTRO DE AMPLITUDES')
%xlabel('Frecuencia [Hz]')
%ylabel('Amplitud [V]')

%APLICACION DEL FILTRO DE BAJAS FRECUENCIAS

[B,A]=butter(6,[38000/FNyq 42000/FNyq],'bandpass'); %Halla las constantes
B y A del filtro
Yfil=filter(B,A,Volt); %Aplicación del filtro Butterworth
plot(Second,Yfil) %Grafica la señal en el dominio del tiempo ya filtrada
title('SEÑAL DE ULTRASONIDO')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
```

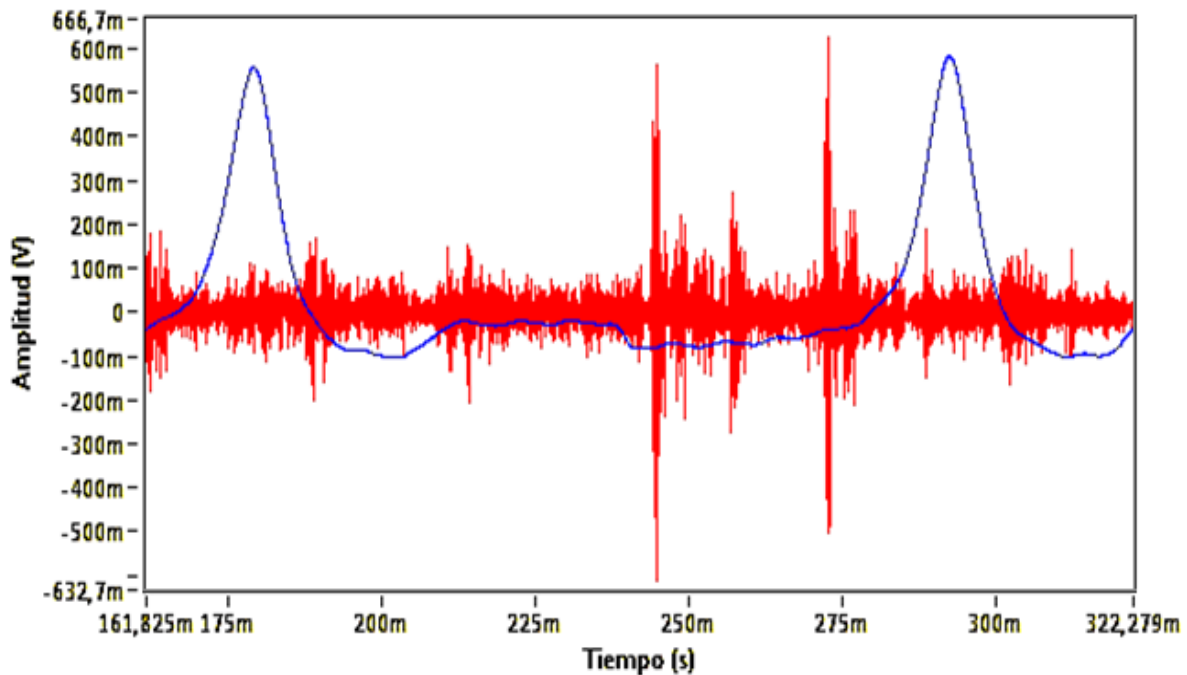
7. SEÑALES DE REFERENCIA EN CONDICIÓN NORMAL DEL MOTOR

Para garantizar un buen funcionamiento del motor, primero, este fue adecuado mediante la realización de un mantenimiento general, el cual involucró un cambio de aceite, calibración de las válvulas de aspiración y descarga, verificación de operación en el punto óptimo de encendido de la mezcla, al igual que una verificación del correcto funcionamiento de las bujías y buena carga en la batería del motor; después de lo cual se procedió a la ejecución de las pruebas.

A continuación se muestran los patrones de vibración y ultrasonido, junto con el comportamiento de los demás sensores utilizados, obtenidos del motor en buen estado de funcionamiento, los cuales fueron utilizados como referencia en la caracterización de las diferentes fallas.

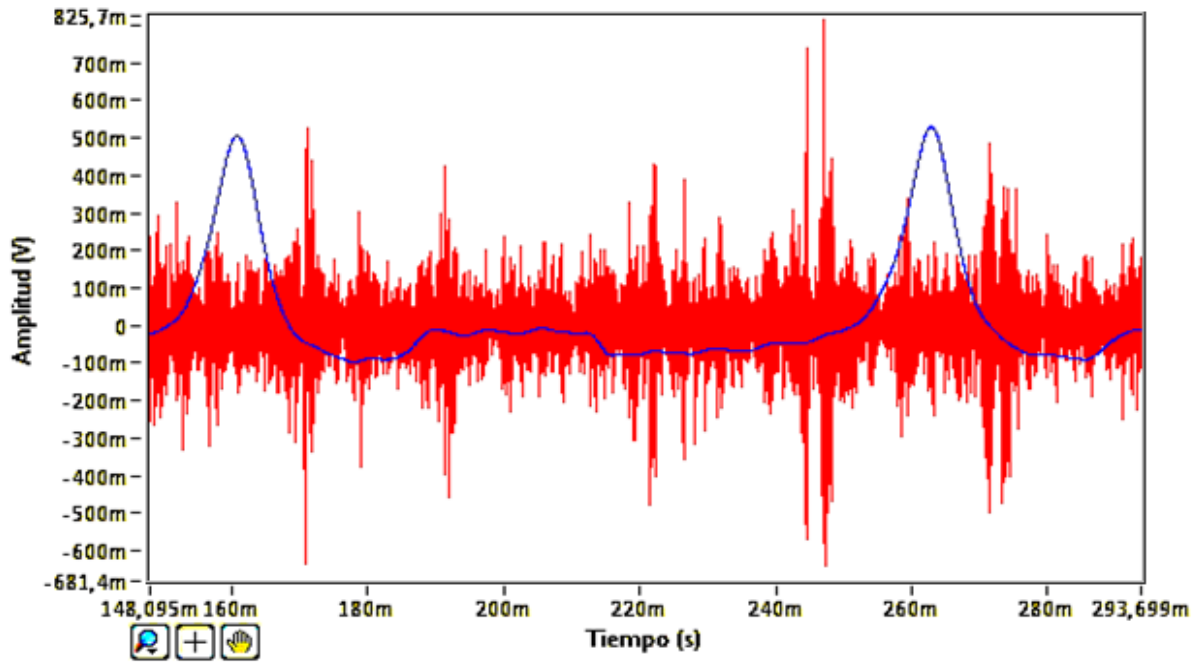
7.1. SEÑALES DE BUEN FUNCIONAMIENTO A 1250 RPM

Figura 18. Patrón de vibración vertical 1250 rpm.



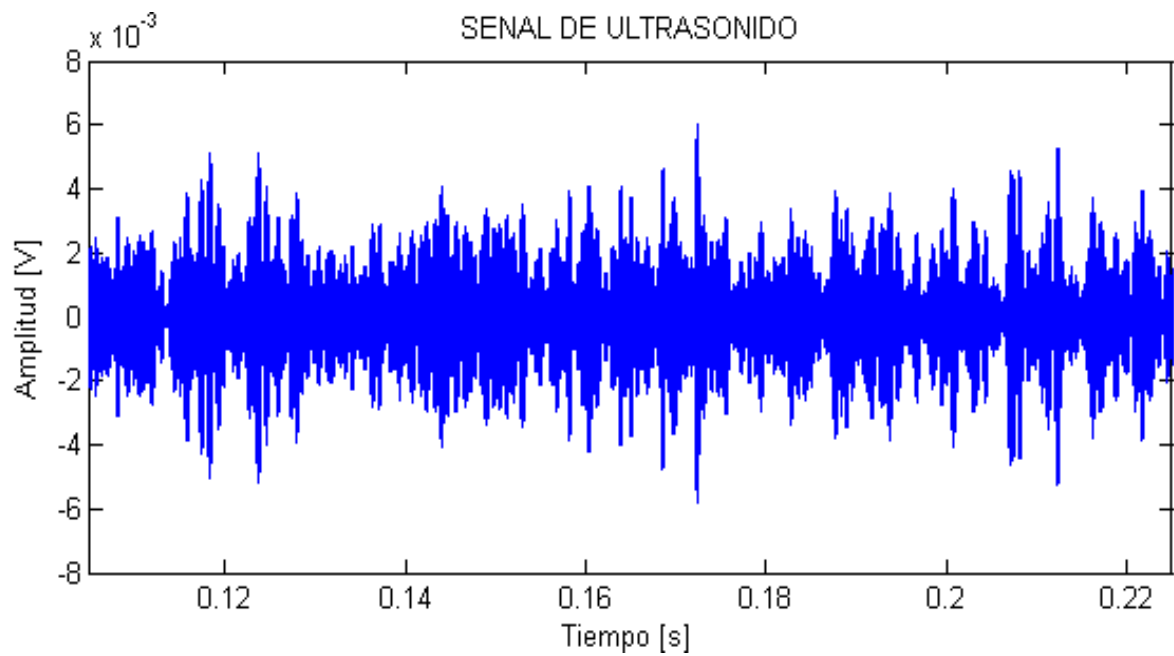
Fuente. Los autores

Figura 19. Patrón de vibración horizontal 1250 rpm.



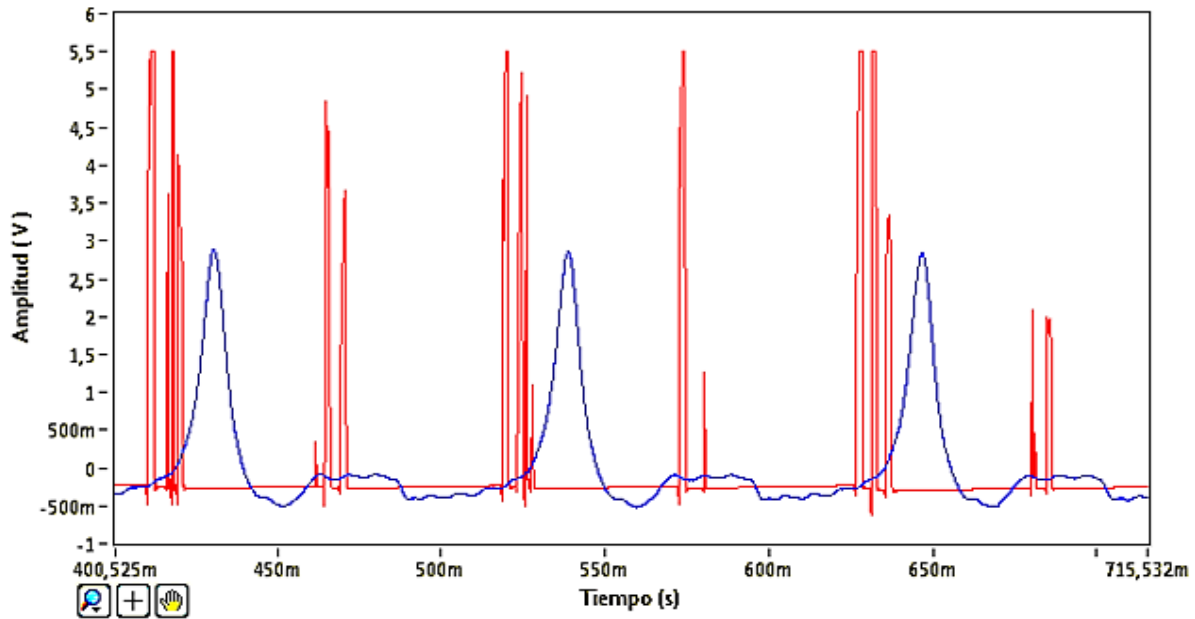
Fuente. Los autores

Figura 20. Patrón de ultrasonido 1250 rpm.



Fuente. Los autores

Figura 21. Patrón de presión 1250 rpm.



Fuente. Los autores

La figura 21 muestra el patrón de presión a 1250 rpm en buen funcionamiento evaluando el comportamiento del cuarto cilindro del motor, generando una señal periódica de máxima amplitud promedio de 2.9 V.

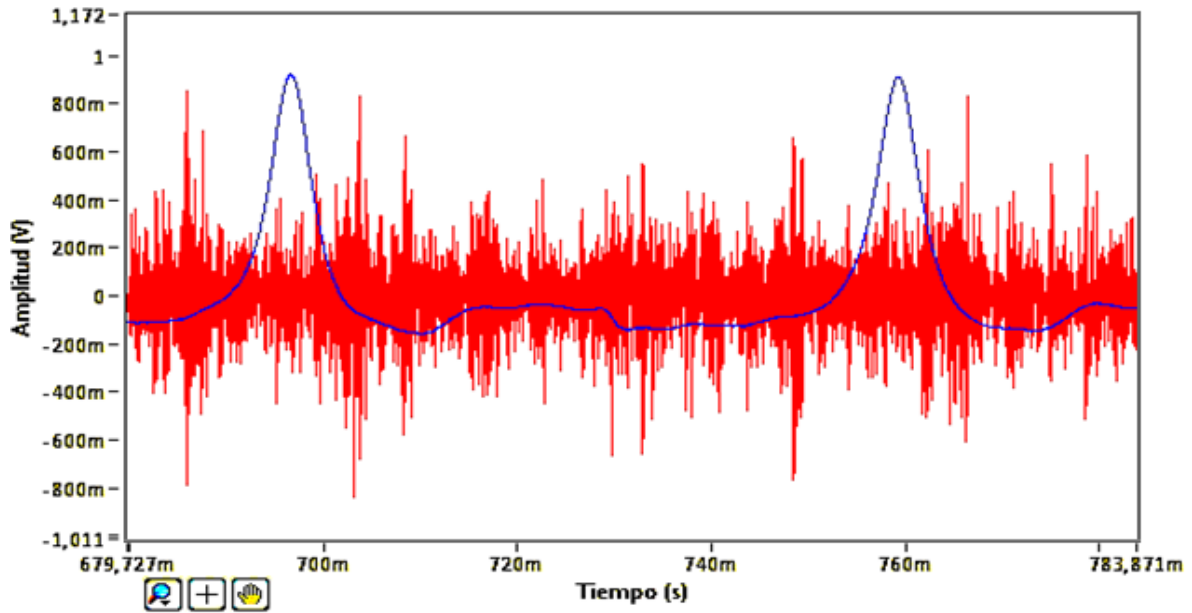
La tabla 2 muestra las temperaturas de cada una de las termocuplas, que se midieron durante la prueba de buen funcionamiento del motor a 1250 rpm y las temperaturas promedio de éstas que serán el patrón de referencia.

Tabla 2. Temperaturas de buen funcionamiento a 1250 rpm.

TEMPERATURAS	INSTANTE DE TIEMPO (30 SEG)										TPROM
T1	412,7	429,7	434,5	432,9	442,8	449	454,1	456,7	457,4	410	438
T2	266,6	272,4	282,5	290,5	295,3	299,9	302,4	315,6	310,6	312	295
T3	350,3	357,9	367,9	376	380,8	381,8	387,3	391,4	396,9	398	379
T4	304,3	325,2	354,7	393,1	407,2	405,6	402	400,3	405,1	402	380
TEMPERATURA PROMEDIO DE FUNCIONAMIENTO											373

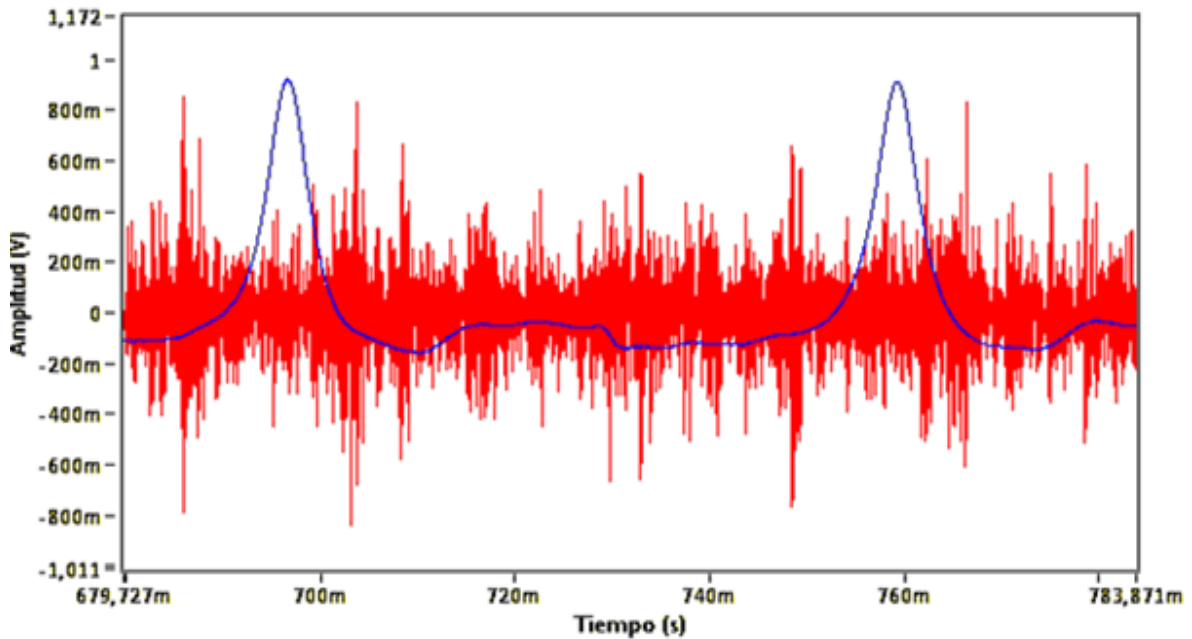
7.2. SEÑALES DE BUEN FUNCIONAMIENTO A 2000 RPM

Figura 22. Patrón de vibración vertical 2000 rpm.



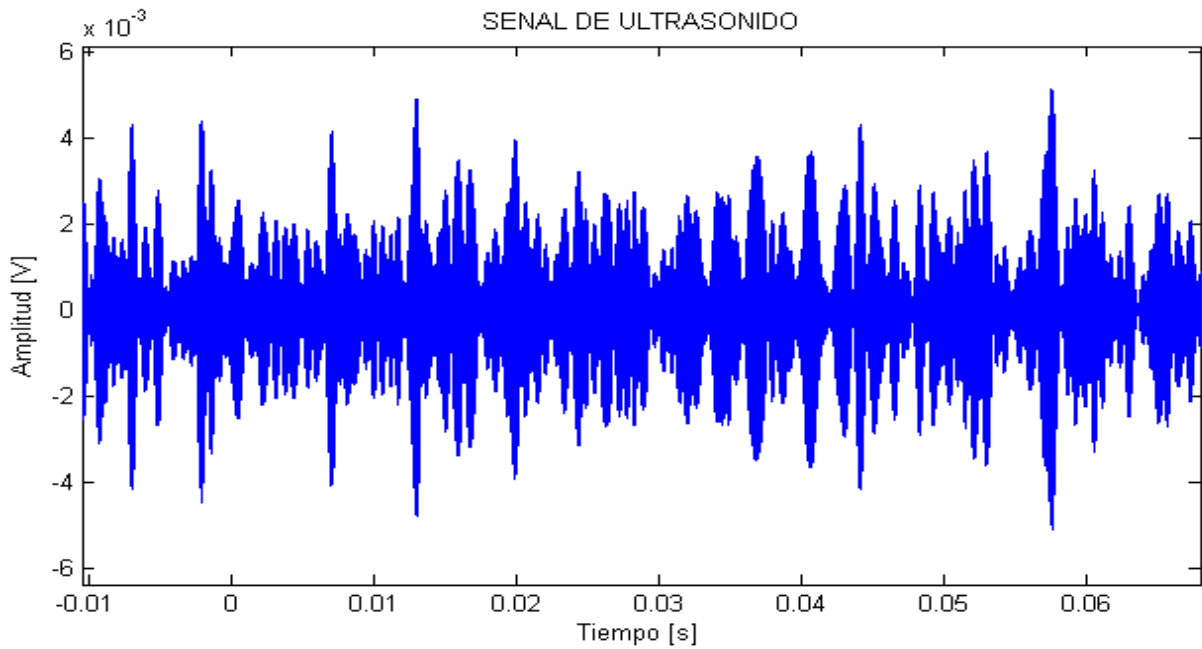
Fuente. Los autores

Figura 23. Patrón de vibración horizontal 2000 rpm.



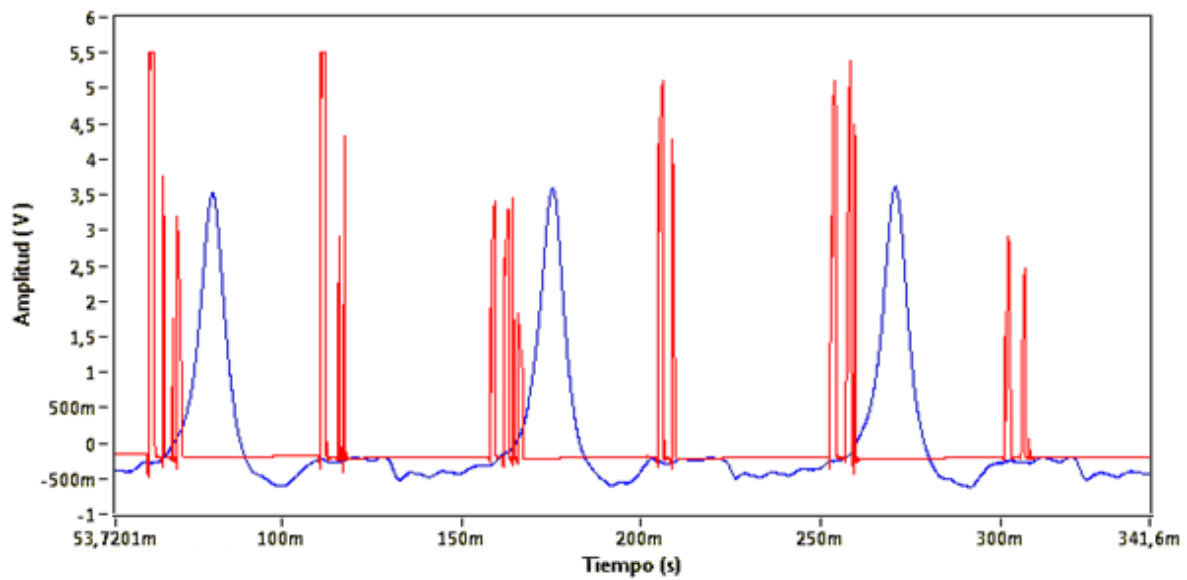
Fuente. Los autores

Figura 24. Patrón de ultrasonido 2000 rpm.



Fuente. Los autores

Figura 25. Patrón de presión 2000 rpm.



Fuente. Los autores

La figura 25 muestra el patrón de presión a 2000 rpm en buen funcionamiento evaluando el comportamiento del cuarto cilindro del motor, generando una señal periódica de máxima amplitud promedio de 3,6 v.

La tabla 3 muestra las temperaturas de cada una de las termocuplas, que se midieron durante la prueba de buen funcionamiento del motor a 2000 rpm y las temperaturas promedio de éstas que serán el patrón de referencia.

Tabla 3. Temperaturas de buen funcionamiento a 2000 rpm.

TEMPERATURAS	INSTANTE DE TIEMPO (30 SEG)						TPROM
T1	509,5	524,2	518,7	528,7	516,1	523,9	520
T2	362,9	375,3	376,9	384,7	390,3	397,1	381
T3	489,2	494	497,5	502,4	500	502,1	498
T4	511,4	469,8	453,4	420,7	426,8	452	456
TEMPERATURA PROMEDIO DE FUNCIONAMIENTO							464

7.3. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA CARACTERIZACIÓN

Como se mencionó anteriormente, para la caracterización de las fallas se emplearán dos regímenes de velocidad del motor (1250 y 2000 rpm), para cada uno de los cuales se tienen los patrones de buen funcionamiento del motor, mostrados anteriormente. Estos patrones serán comparados con los correspondientes obtenidos de las pruebas con inducción de falla, de tal forma que se buscarán las diferencias más significativas entre ellos y que además, sean constantes y permanentes en las diferentes gráficas relacionadas con el mismo tipo de falla, independiente también del régimen de velocidad del motor, de tal forma, que dicha variación se pueda corroborar y certificar como patrón característico de la falla. Para abreviar el nombre de las diferentes gráficas, se empleó la siguiente nomenclatura dependiendo del tipo de señal mostrada:

Nomenclatura de las señales:

V.V. = Vibración vertical (acelerómetro 1)

V.H. = Vibración horizontal (acelerómetro 2)

S.U. = Señal de ultrasonido (Sensor de ultrasonido)

S. Presión = Señal de presión (Sensor de presión)

8. FALLA POR MAL FUNCIONAMIENTO DE LAS BUJÍAS

8.1. PRINCIPIOS TEÓRICOS

La bujía es el elemento que produce el encendido de la mezcla de combustible y aire en los cilindros mediante una chispa, en un motor de combustión interna de encendido. Su correcto funcionamiento es crucial para el buen desarrollo del proceso de combustión/expansión del ciclo Otto. Este elemento pertenece al sistema de encendido del motor y actúa en la fase de explosión de este.

Figura 26. Bujía nueva.



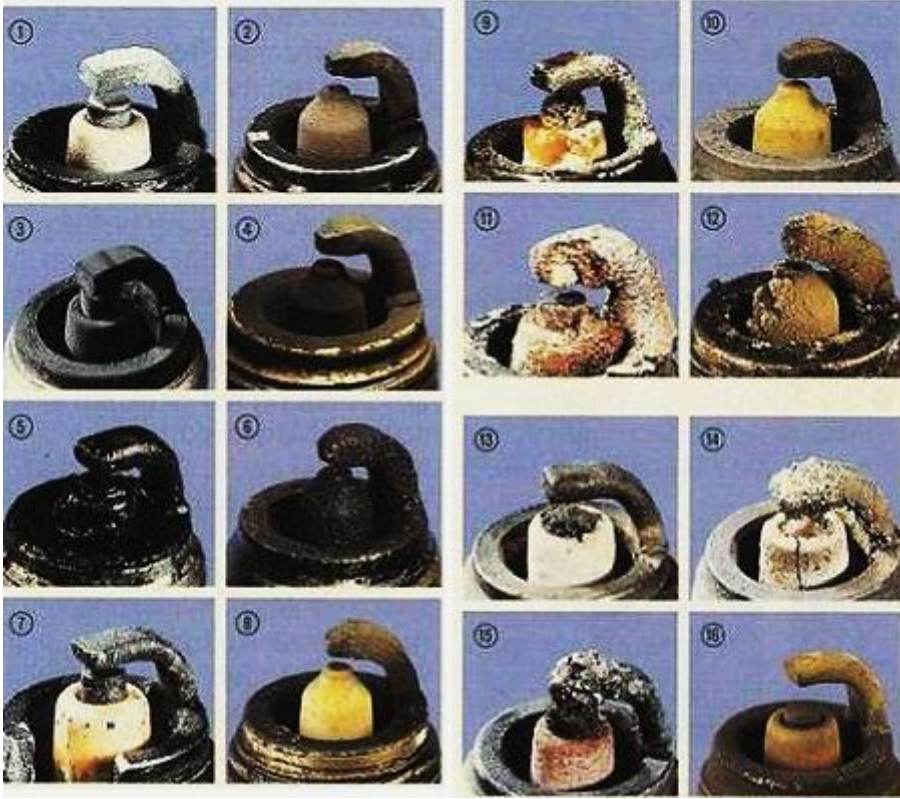
Fuente. http://2.bp.blogspot.com/-WB_h5W97f0M/T8dtETGI1OI/AAAAAAAAAB3Y/8-B8WTv5B00/s1600/bujia.jpg

La bujía tiene dos funciones primarias:

- ✓ Inflamar la mezcla de aire y combustible.
- ✓ Disipar el calor generado en la cámara de combustión hacia el sistema de refrigeración del motor.

Diagnósticos de un mal funcionamiento en las bujías.

Figura 27. Fallas frecuentes en las bujías.



Fuente. http://www.gnceros.com.ar/bib/mecanica/diagnostico_bujias_02.jpg

La figura 27 muestra algunos de los estados de mal funcionamiento de las bujías:

- ✓ Fotos 1 y 2: Estado normal.
- ✓ Fotos 3 y 4: Con hollín (hay que regular mezcla, dispositivo de arranque y filtro de aire).
- ✓ Fotos 5 y 6: Engrasadas (revisar motor, revisar combustible, cambiar bujías).
- ✓ Fotos 7 y 8: Emplomadas (cambiar bujías...no tiene sentido la limpieza).
- ✓ Fotos 9 y 10: Fuerte contenido en plomo (cambiar bujías...no tiene sentido la limpieza).

- ✓ Fotos 11 y 12: Generación de cenizas: (regular motor, cambiar bujías y revisar aceite utilizado).
- ✓ Foto 13: Electrodo fundido (revisar motor, encendido y sistema de mezcla. utilizar bujías con valor energético adecuado).
- ✓ Foto 14: Electrodo fundido (revisar motor, encendido y sistema de mezcla. cambiar bujías).
- ✓ Foto 15: Electrodo fundido (revisar motor, encendido y sistema de mezcla. cambiar bujías).
- ✓ Foto 16: Desgaste excesivo del electrodo central (bujías nuevas).

Análisis de fallas en el mal funcionamiento de las bujías:

El mal funcionamiento en las bujías da como resultado no generar el suficiente voltaje que se debe proveer al sistema de ignición para que pueda generarse la chispa, debido a alguno de los problemas anteriormente mencionados o simplemente ausencia de los estados 1 o 2 de ellas en el sistema. Esta falla se puede identificar mediante el desgaste o deterioro del electrodo interior y/o electrodo exterior que puede provocar problemas de arranque, empeorar la economía de consumo y provocar combustiones falsas durante la aceleración. También puede causar daños en otros componentes secundarios del sistema de ignición, cables eléctricos, las bobinas o el distribuidor.

En general, el mal funcionamiento de una bujía trae como principal consecuencia el no encendido de la mezcla, reduciendo la presión máxima en el cilindro y a su vez, generando un desbalance de las fuerzas torsionales sobre el cigüeñal que producen una variación en la señal de vibración del motor, precisamente lo que se analizará a continuación.

8.2. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

8.2.1. Inducción de la falla

El método utilizado para simular el mal funcionamiento de las bujías fue sencillamente desconectándolas completamente como se muestra en la figura 28, cortando así el paso de corriente eléctrica hacia cada una de éstas, sacándolas de funcionamiento. Las pruebas se realizaron para cada una de las cuatro bujías del motor y para los dos regímenes de velocidad estudiados, 1250 y 2000 rpm; además, cada una de estas pruebas se repitió cuatro veces, permitiendo analizar de cada una de ellas diferentes periodos de tiempo a lo largo de la señal captada, corroborando que las señales tendían a un mismo comportamiento estable, del cual se seleccionó una imagen representativa del comportamiento promedio de la señales para cada una de las pruebas. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Figura 28. Bujía 3 desconectada.

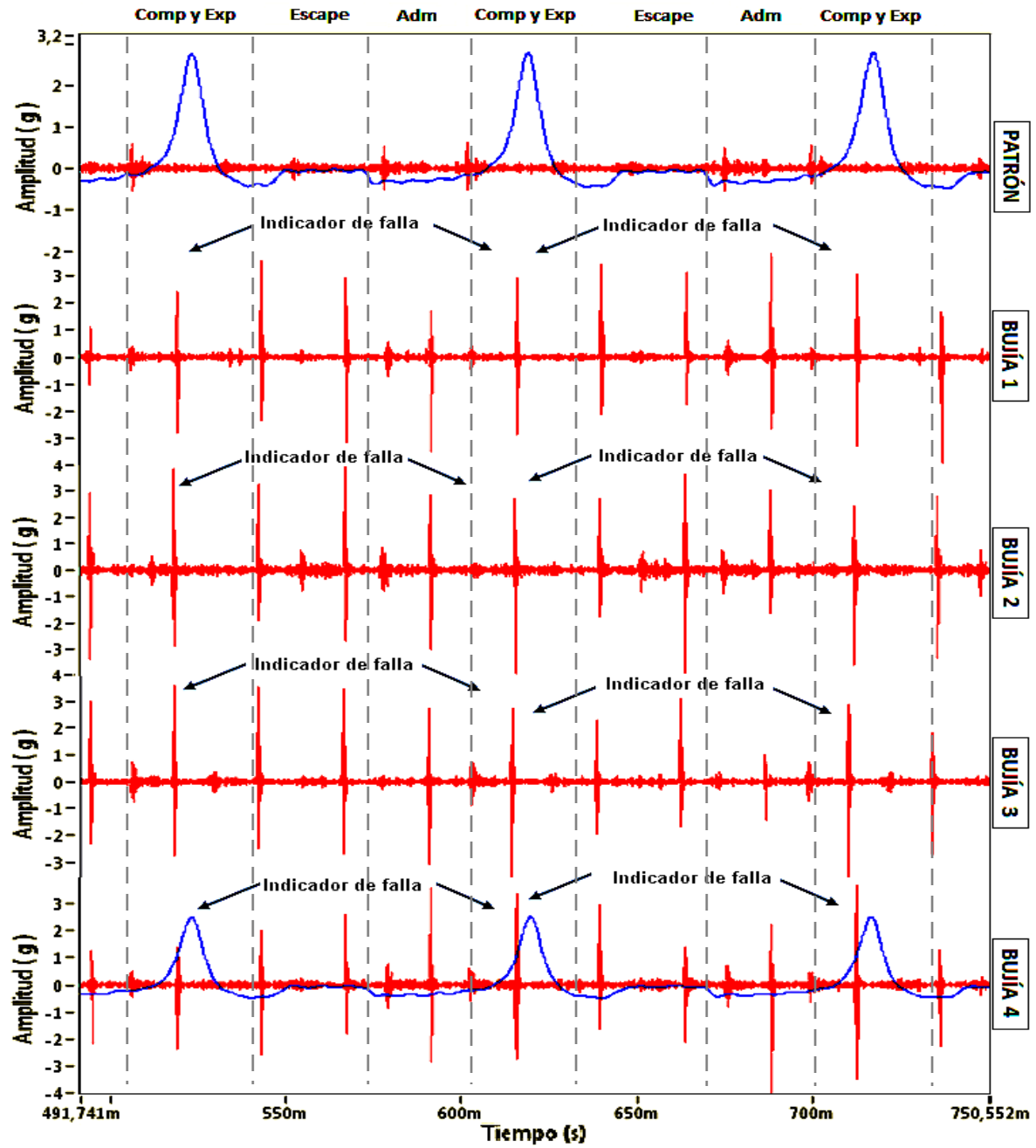


Fuente. Los autores.

8.2.2. Señales adquiridas

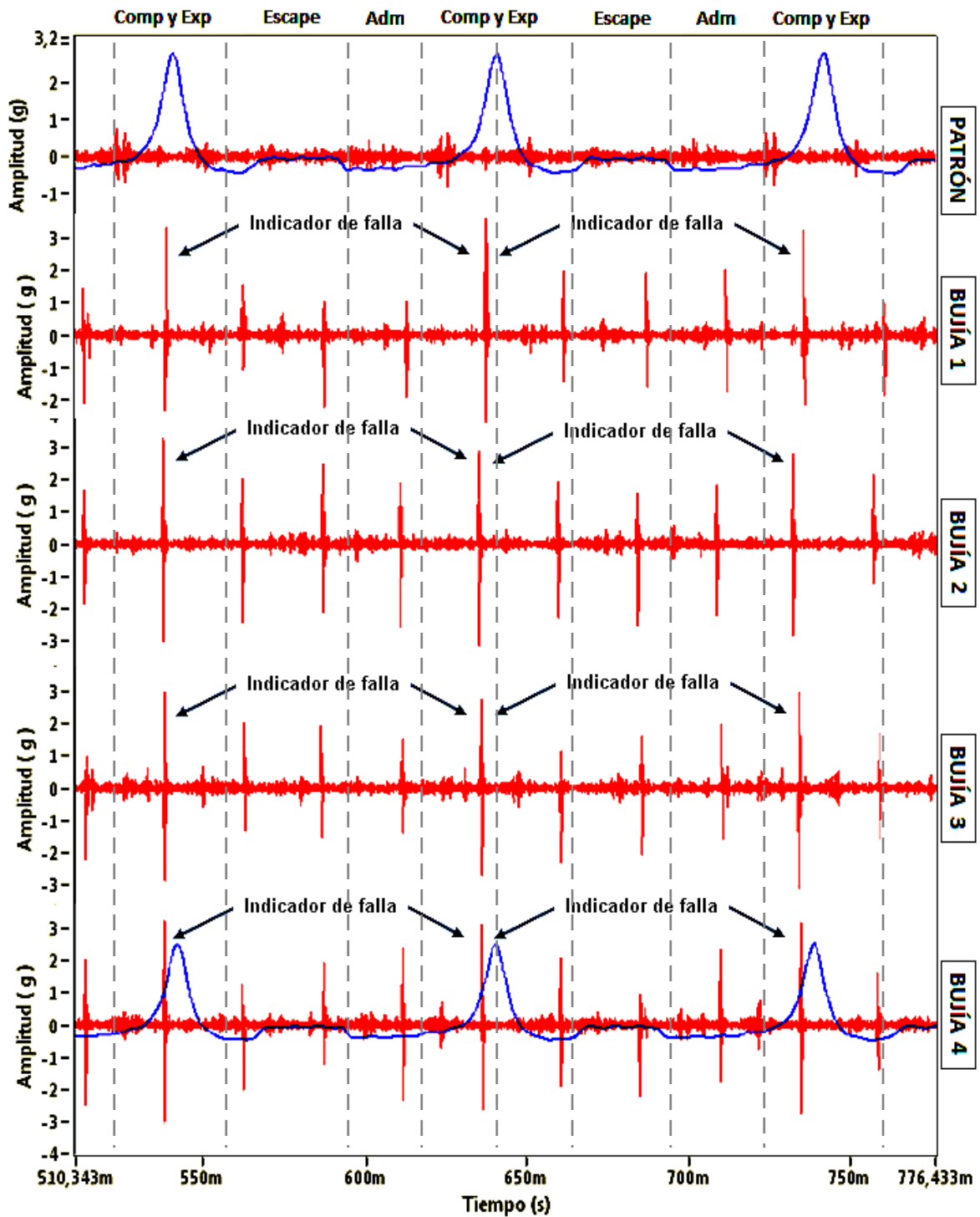
8.2.2.1. Señales a 1250 rpm

Figura 29. V.V. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 1250 rpm.



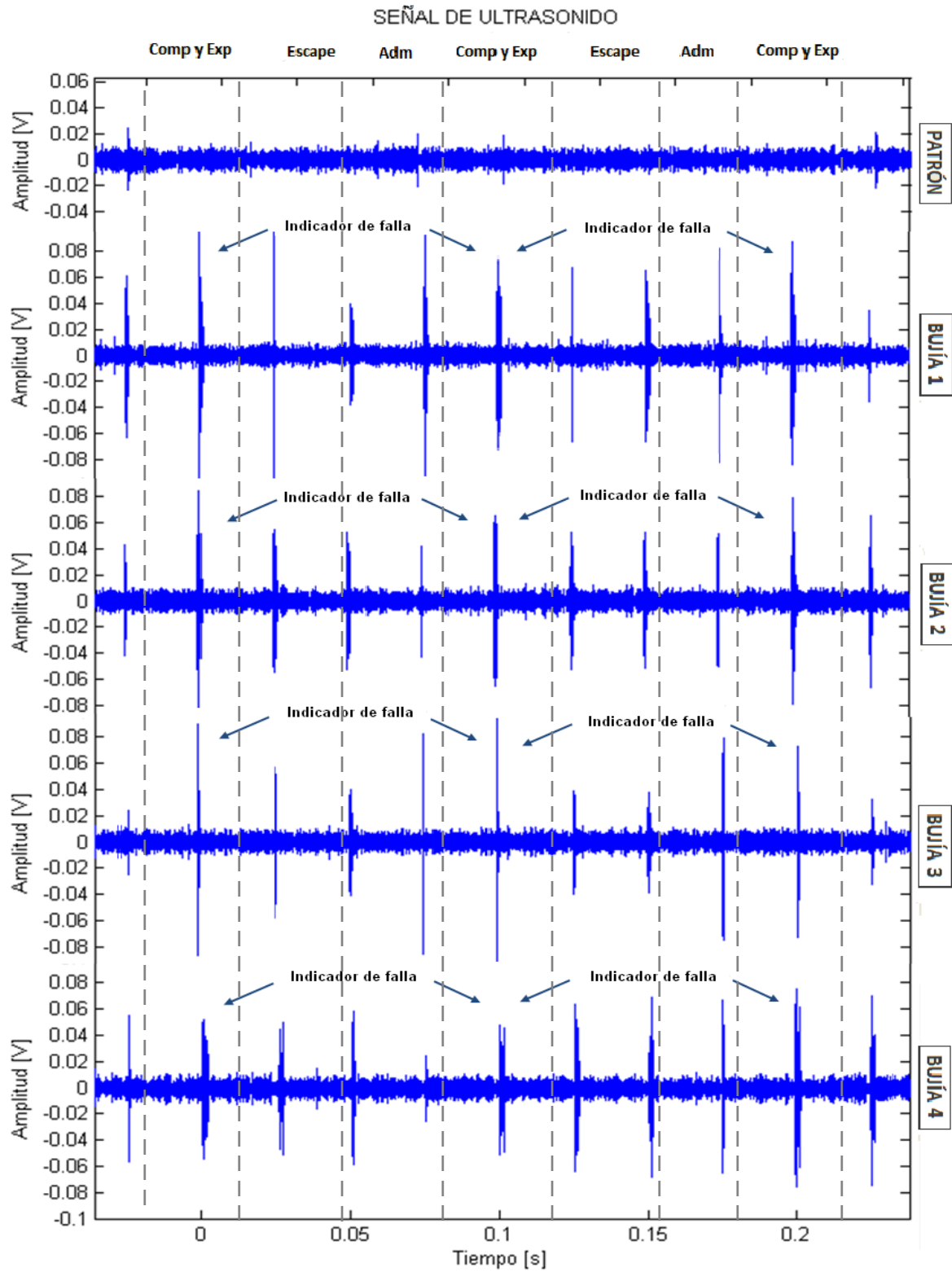
Fuente. Los autores.

Figura 30. V.H. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 1250 rpm.



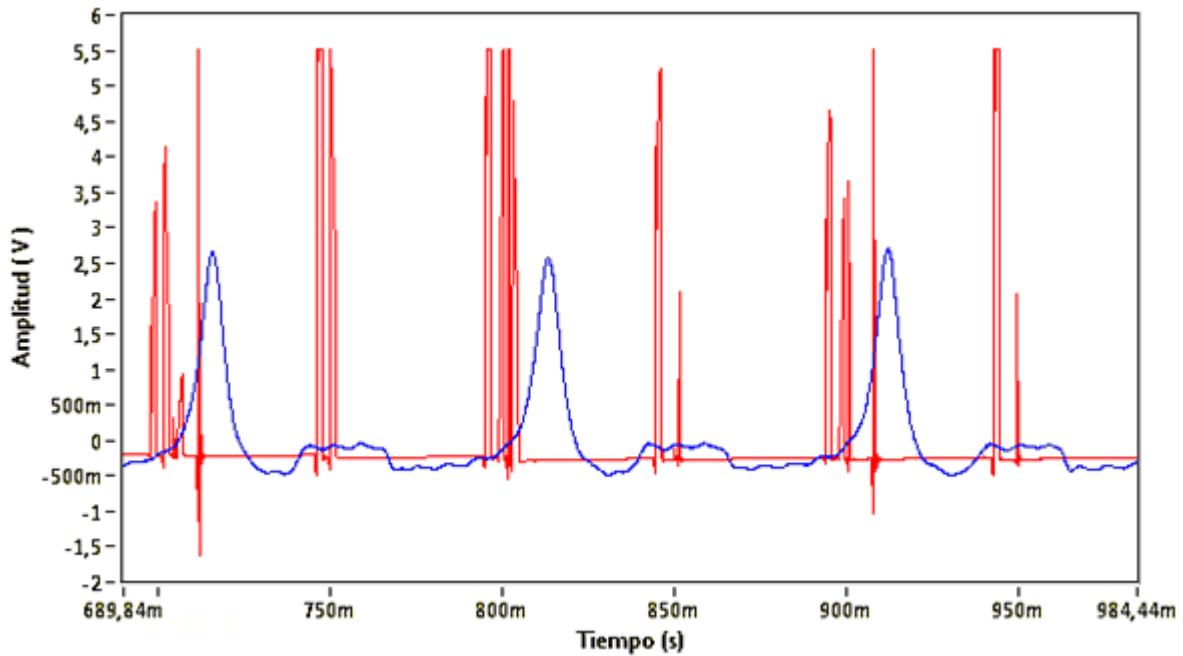
Fuente. Los autores.

Figura 31. S.U. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 1250 rpm.



Fuente. Los autores.

Figura 32. S. Presión: Bujías 4 desconectada a 1250 rpm.



Fuente. Los autores.

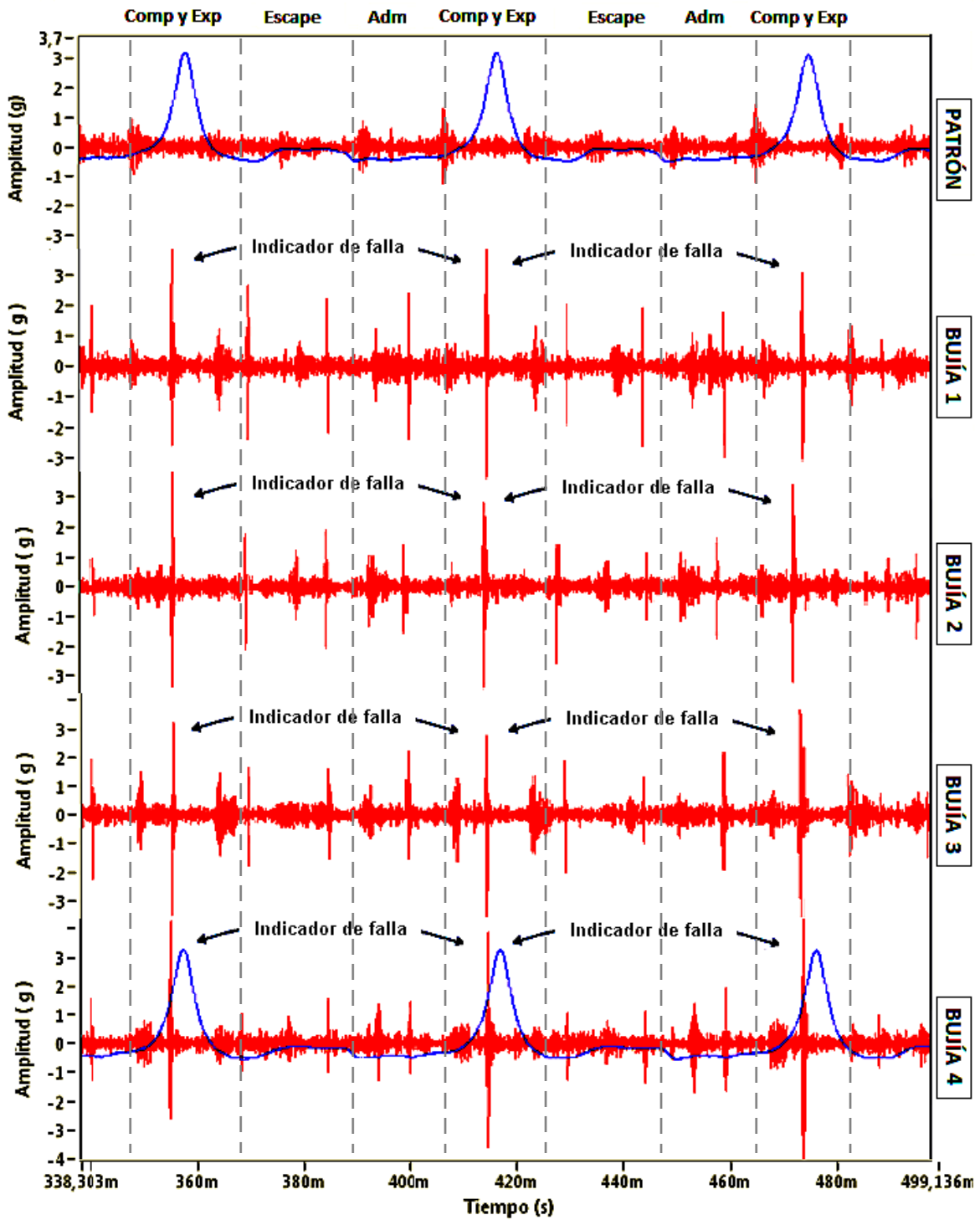
La siguiente tabla muestra las temperaturas en cada una de las pruebas anteriores:

Tabla 4. Temperaturas de las pruebas de bujías a 1250 rpm.

1250 RPM PRUEBA	TEMPERATURAS				
	T1	T2	T3	T4	Tprom
Bujía 1 desconectada	123	248	350	345	267
Bujía 2 desconectada	405	145	318	385	313
Bujía 3 desconectada	360	235	169	362	282
Bujía 4 desconectada	358	282	356	122	280
Bujías 1 y 3 desconectadas	63	253	131	65	128
Bujías 2 y 4 desconectadas	431	149	381	109	268

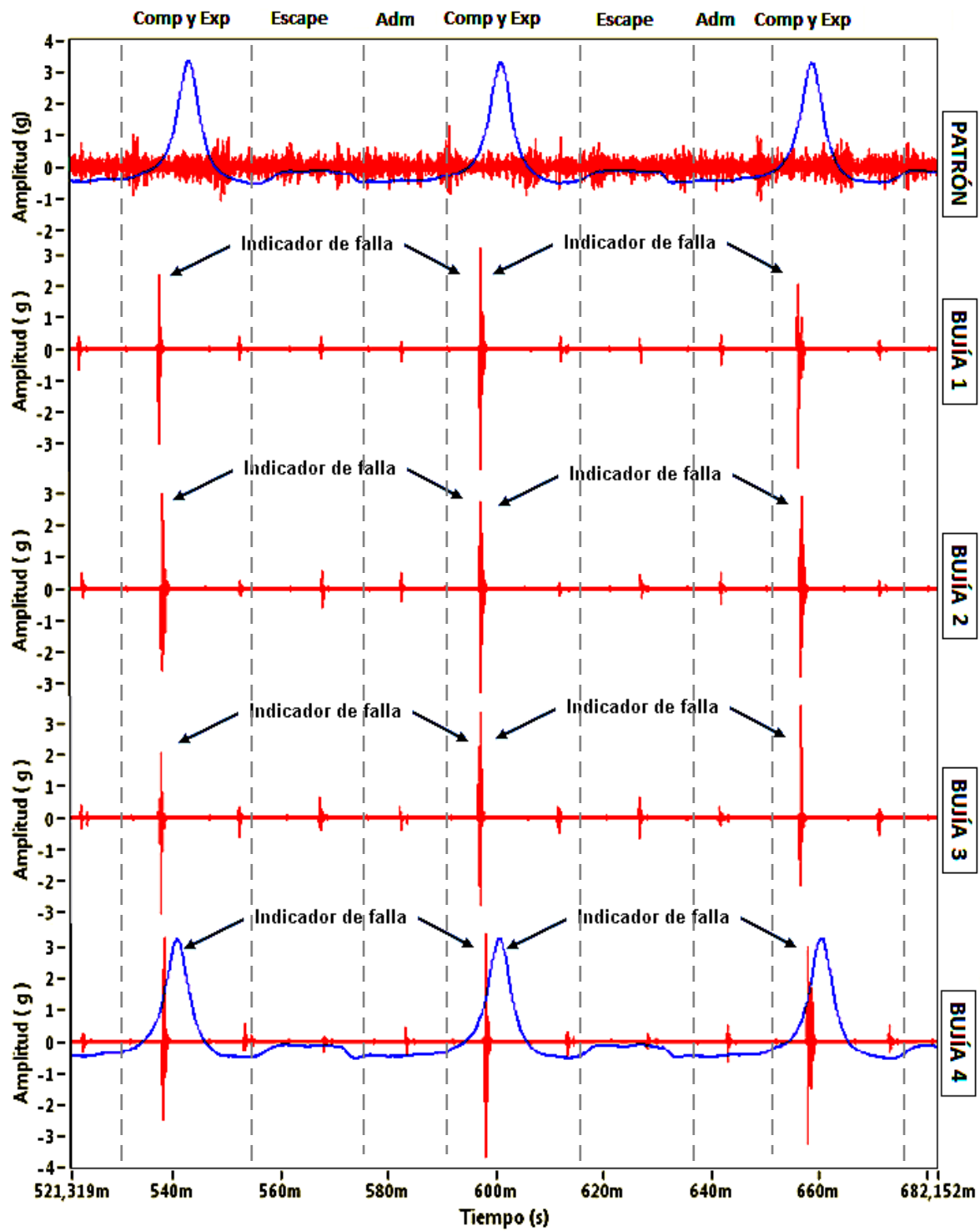
8.2.2.2. Señales a 2000 rpm

Figura 33. V.V. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 2000 rpm.



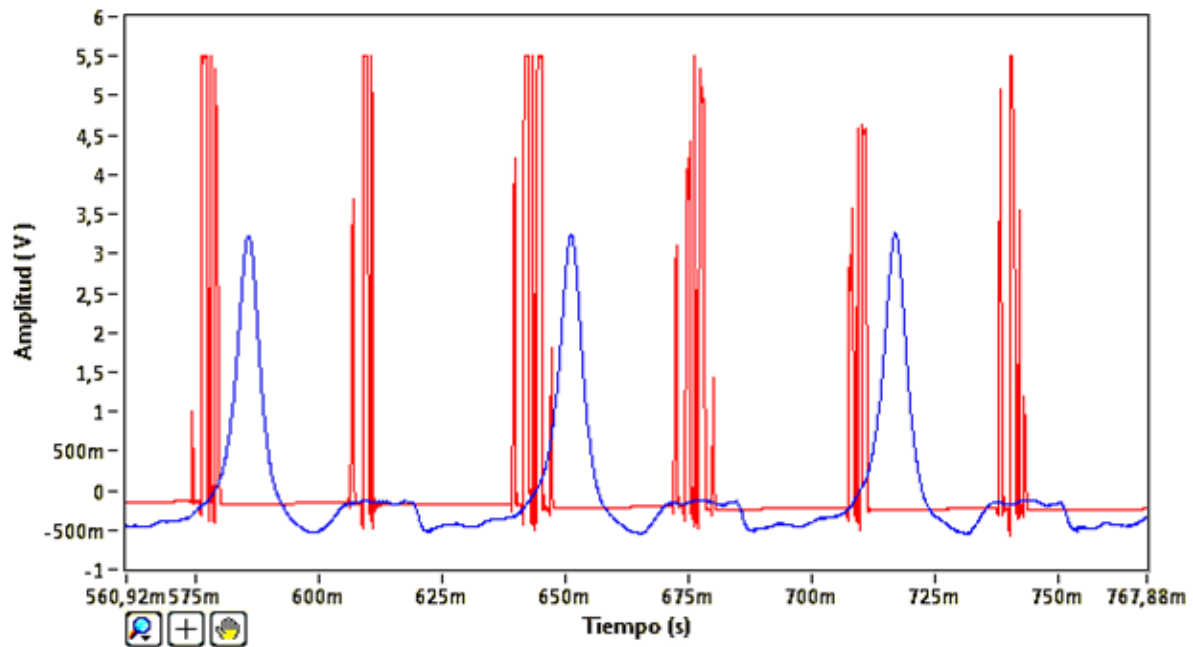
Fuente. Los autores.

Figura 34. V.H. Bujías 1, 2, 3 y 4 desconectada respectivamente 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

Figura 35. S. Presión: Bujía 4 desconectada 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

La tabla 5 muestra las temperaturas promedio en cada uno de los cilindros durante las diferentes pruebas con bujías a 2000 rpm:

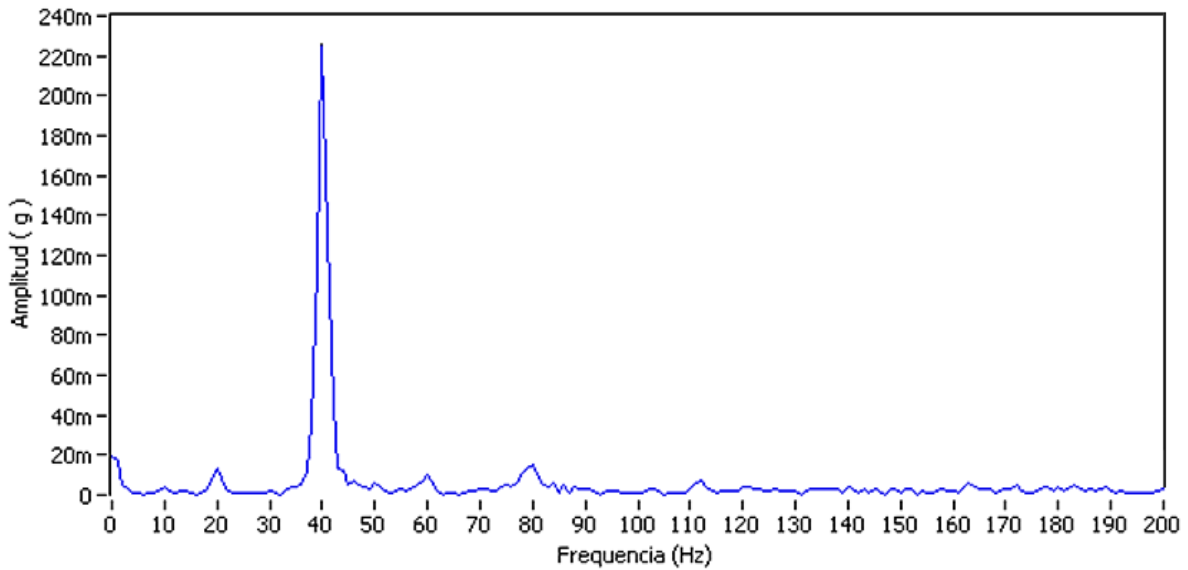
Tabla 5. Temperaturas de las pruebas de bujías a 2000 rpm.

2000 RPM	TEMPERATURAS				
	PRUEBA	T1	T2	T3	T4
Bujía 1 desconectada	103	372	497	362	334
Bujía 2 desconectada	484	177	431	481	393
Bujía 4 desconectada	304	221	296	105	232
Bujías 1 y 3 desconectadas	114	276	176	350	229
Bujías 2 y 4 desconectadas	456	209	395	112	293

8.2.2.3. Resultados en el dominio de la frecuencia

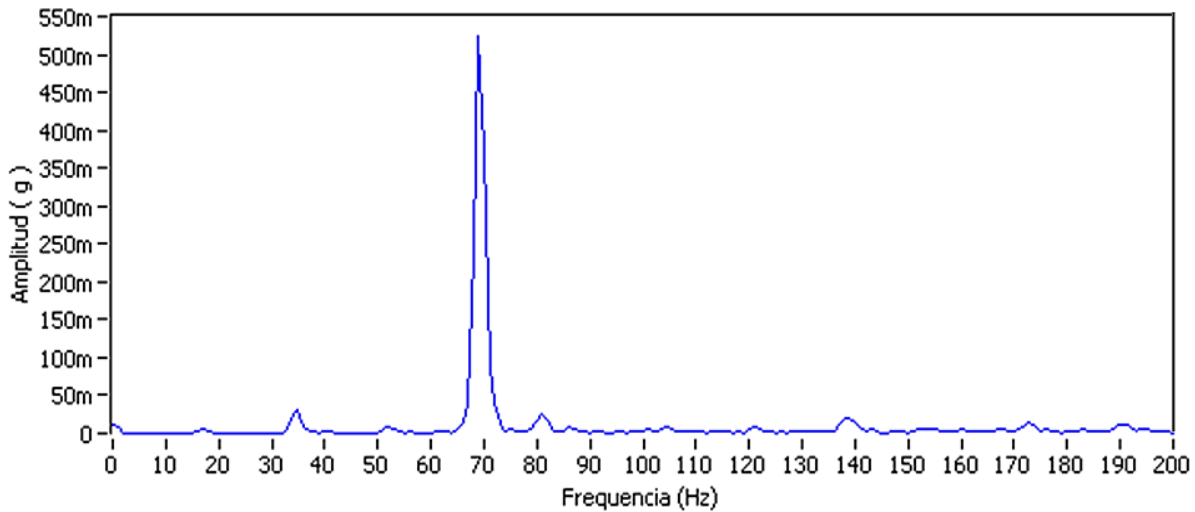
La falla por mal funcionamiento de las bujías además parece estar relacionada con la aparición de picos en las bajas frecuencias del espectro de vibración como se muestra a continuación:

Figura 36. Espectro de buen funcionamiento V.V. 1250 rpm.



Fuente. Los autores.

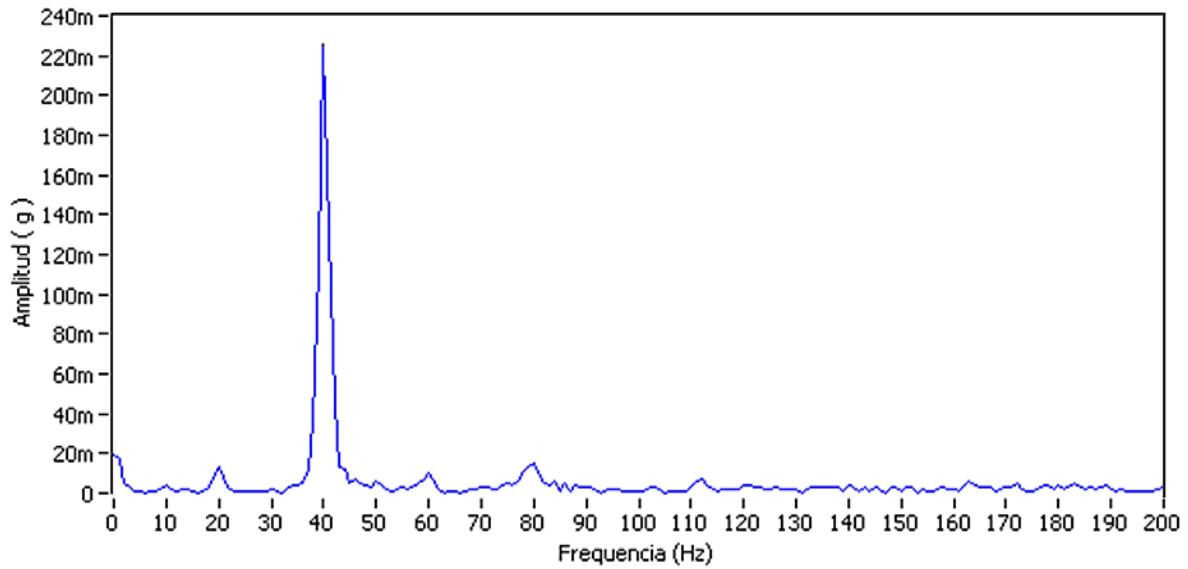
Figura 37. Espectro de buen funcionamiento V.V. 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

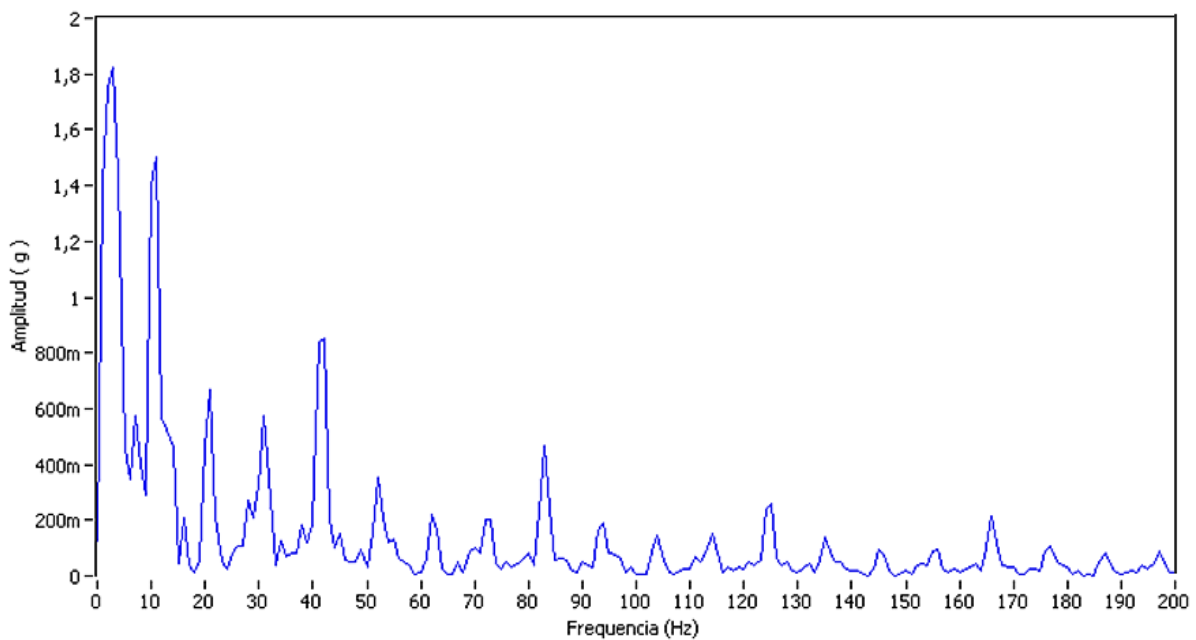
Mientras que al inducir la falla se generaron los siguientes espectros:

Figura 38. V.V. Espectro bujía 1 desconectada 1250 rpm.



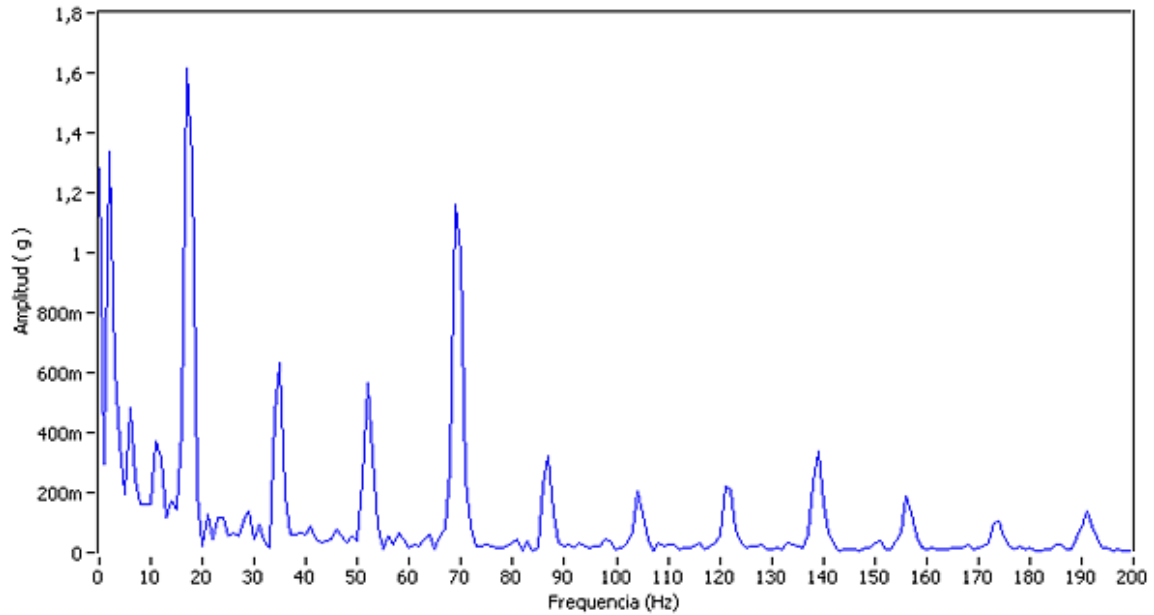
Fuente. Los autores.

Figura 39. V.V. Espectro bujía 4 desconectada 1250 rpm.



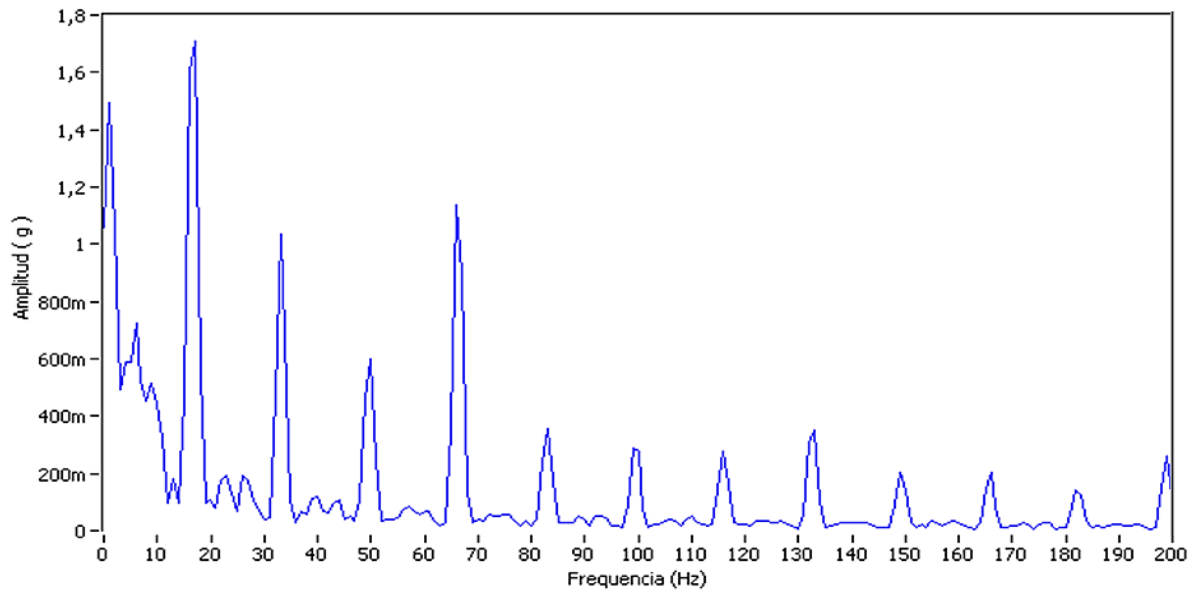
Fuente. Los autores.

Figura 40. V.V. Espectro bujía 1 desconectada 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

Figura 41. V.V. Espectro bujía 4 desconectada 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

El anterior fenómeno fue detectado tanto en los espectros de vibración vertical como horizontal al inducir ésta falla.

8.2.3. Análisis de resultados y caracterización de la falla

- Una falla en las bujías aumenta el nivel de vibración del motor, ya que al generarse la falla hay un desbalanceo de las fuerzas sobre el cigüeñal que produce perturbaciones. En general, se detectó claramente casi en la totalidad de las gráficas obtenidas, la aparición de cuatro picos igualmente espaciados y de gran amplitud de vibración, por cada ciclo del motor. Además, se observó que uno de ellos, el señalado con la flecha de indicador de falla en cada una de las gráficas, es el que presenta la mayor amplitud de vibración.
- Como se puede ver claramente en la gran mayoría de las figuras de vibración mecánica tanto en dirección vertical como horizontal y para ambos regímenes de velocidad analizados, 1250 y 2000 rpm, ver las figuras 29, 30, 33 y 34, especialmente en la figura 34 de vibración en dirección horizontal a 2000 rpm, la falla por mal funcionamiento en las bujías parece estar altamente relacionada con la aparición de cuatro picos de gran amplitud por cada ciclo de rotación del motor, esto en comparación con el estado de buen funcionamiento en el cual no aparece ninguno de estos picos.
- Además, en la figura 34 de vibración mecánica en dirección horizontal a 2000 rpm, se puede observar claramente que el pico de mayor amplitud, comparado con los otros tres picos característicos de esta falla, e indicado en la gráfica con la flecha de indicador de falla, se encuentra ubicado en la etapa de compresión del ciclo de combustión del cilindro correspondiente a la bujía desconectada, aparentemente, aparece en el instante en el que ocurre la ignición de la mezcla, lo cual permitiría saber cuál de las bujías es la que se encuentra fallando en un proceso de detección de fallas.
- En el dominio de la frecuencia, los espectros mostrados en las figuras 38 al 41 comparadas con los patrones de buen funcionamiento mostrados en las figuras

36 y 37, muestran un patrón de falla relativamente bien definido, el cual se caracteriza por una excitación de las bajas frecuencias, tanto enteras como intermedias de la frecuencia fundamental; se observa claramente una serie de picos de magnitud decreciente comenzando en el 0.5x, 1x, 1.5x, 2x, 2.5x, 3x, 3.5x, 4x, 4.5x, 5x, 5.5x, 6x, ..., y así sucesivamente, hasta la frecuencia del 10x con magnitud significativa, fenómeno que se observó tanto en los espectros de vibración vertical como horizontal. Este es un espectro característico de problemas de fricción o rozamiento mecánico, quizás, eso es lo que está sucediendo, ya que al fallar una bujía, el cigüeñal es el que obliga al cilindro inactivo a moverse a la fuerza, por lo cual el pierde su sincronía generándose rozamiento en oposición al movimiento obligado, o quizás se produzca fricción en alguna otra parte del motor generando dicho espectro.

- Este fenómeno también se pudo corroborar mediante el análisis de las señales de ultrasonido, ya que en ellas se puede observar claramente el mismo patrón de falla, la aparición de cuatro picos de gran amplitud por cada ciclo del motor, como se muestra en la figura 31, junto con la correlación de aparición del pico de mayor grosor en el instante en el cual ocurre la ignición de la bujía que se encuentra fallando, lo cual permite corroborar y establecer dicho fenómeno como una clara característica de esta falla.
- Las señales de presión muestran una reducción considerable en la amplitud máxima promedio o máxima presión en el pistón 4 del motor como se muestra las figuras 32 y 35, mostrando una presión máxima promedio de 2,6 y 3,25 [V] para los regímenes de velocidad de 1250 y 2000 rpm respectivamente, comparados con los 2,9 y 3,6 [V] de la condición normal; este resultado es tal como se esperaba según la documentación leída, ya que al desconectar la bujía, no ocurrirá la combustión de la mezcla por lo cual la presión en este cilindro no debería subir tanto. En cuanto a la forma de la señal no se aprecia variación considerable con los patrones de buen funcionamiento.

- Como se puede observar en las tablas 2, 3, 6 y 7, la falla en las bujías trae como consecuencia una importante caída en la temperatura de salida de los gases de combustión del cilindro específico en el cual se está presentando la falla, esto es comprensible, ya que al no haber un correcto funcionamiento de la bujía, no se producirá ni la chispa, ni el adecuado encendido de la mezcla para que se produzca la combustión de la mezcla en tal cilindro del motor, por los que se debería reducir considerablemente la temperatura de los gases en ese cilindro. En la tabla 6 por ejemplo, en la prueba de desconexión de la bujía 1 del motor a 1250 rpm, se obtuvo una temperatura promedio de salida de los gases en el cilindro uno de 123 °C, una temperatura 315 °C inferior a la obtenida en el cilindro un de la prueba de buen funcionamiento al mismo régimen de velocidad. Lo mismo se observó en las pruebas a en régimen de velocidad de 2000 rpm de la tabla 7, mostrando caídas de temperatura en el cilindro correspondiente a la falla, incluso más grandes, del orden de 400 °C con respecto a las temperaturas de buen funcionamiento en ese mismo cilindro.

9. FALLA POR OBSTRUCCIÓN EN LAS LINEAS DE SUCCIÓN Y DE DESCARGA

9.1. PRINCIPIOS TEÓRICOS

Línea de succión: Es la línea a través de la cual se lleva la carga de mezcla vaporizada de aire/combustible al pistón. Consta principalmente del carburador, el ducto de admisión y la válvula de admisión.

Sistema de escape: Este sistema conduce los gases del motor al exterior. Los gases producto de la combustión, son expulsados por el pistón en su carrera ascendente y salen a través de la válvula de escape al múltiple o conducto colector, de este, el sistema puede derivar en uno o varios catalizadores para disminuir las emisiones de los gases peligrosos y de allí al silenciador para disminuir el nivel sonoro del sistema, de donde salen al exterior a través de la cola de escape o ducto de salida.

Análisis de la falla por obstrucción:

Este tipo de falla consiste en el taponamiento u obstrucción de la línea de succión o de descarga producto de la suciedad excesiva en filtros o alguna otra anomalía. Esta falla se puede detectar mediante la observación de los picos máximos y mínimos de la presión en el diagrama. En la figura 42 se puede observar la influencia de realizar restricciones en la tubería de succión para un motor de combustión interna de cuatro tiempos encendido con chispa.

volumen en el cilindro al deslizarse el pistón y, por tanto, se crea una depresión. En el primer caso, el trabajo perdido por bombeo es mínimo, y la superficie negativa muy reducida; en el segundo caso, el trabajo perdido es notable, y la superficie negativa, muy grande.

9.2. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

9.2.1. Inducción de la falla por obstrucción en la línea de succión

El método que se utilizó para provocar la obstrucción en la línea de succión fue mediante la adición de un filtro de aire en mal estado, con características de suciedad y deterioro; además, se indujo una obstrucción mayor mediante el bloqueo del ducto de entrada de aire del carburador con una lámina metálica de acero, se tomaron dos niveles de severidad: primero con una obstrucción del 50% y segunda del 75% del área de entrada de aire.

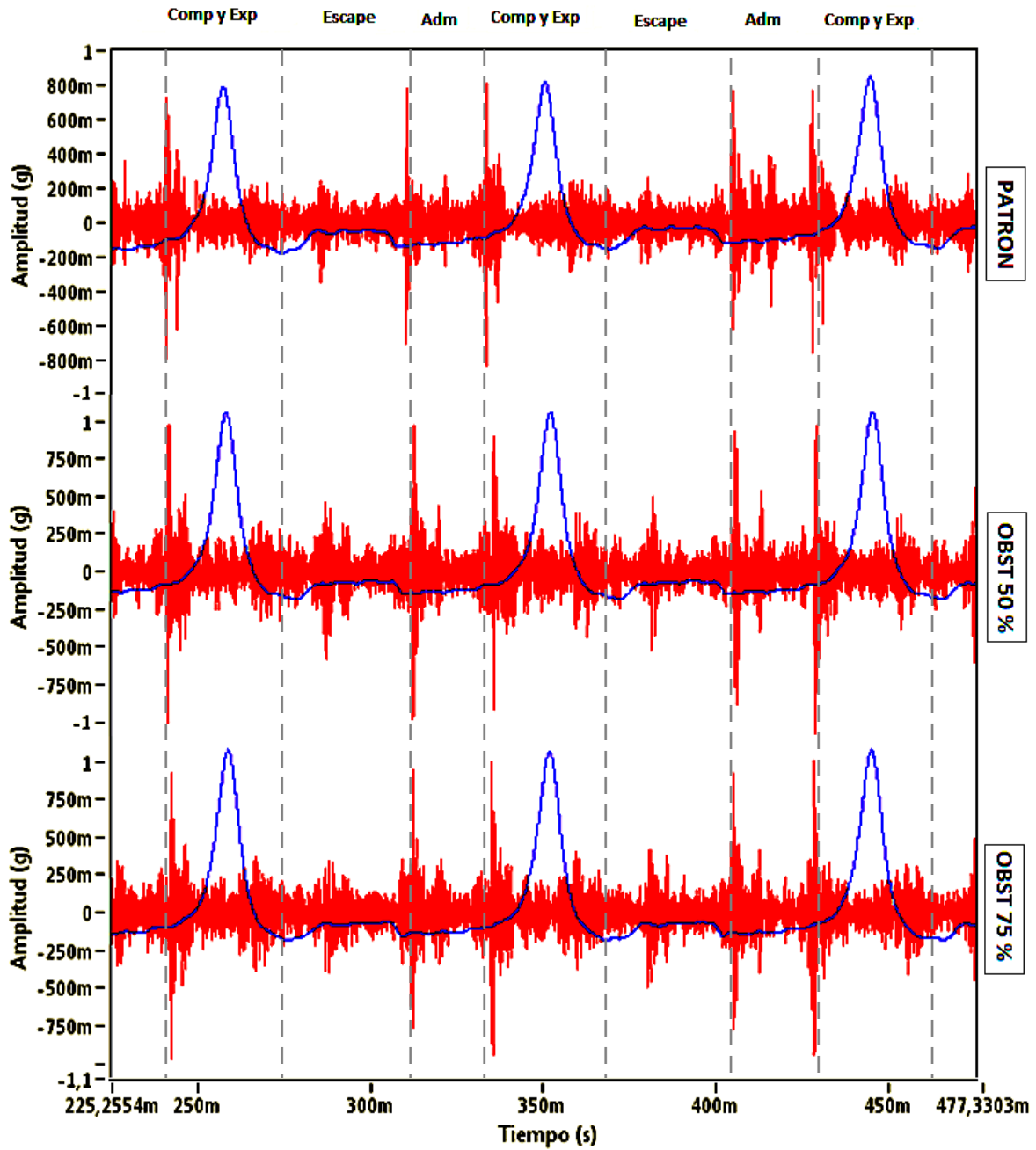
Figura 43. Inducción de la falla mediante obstrucción en la succión.



Fuente. Los autores.

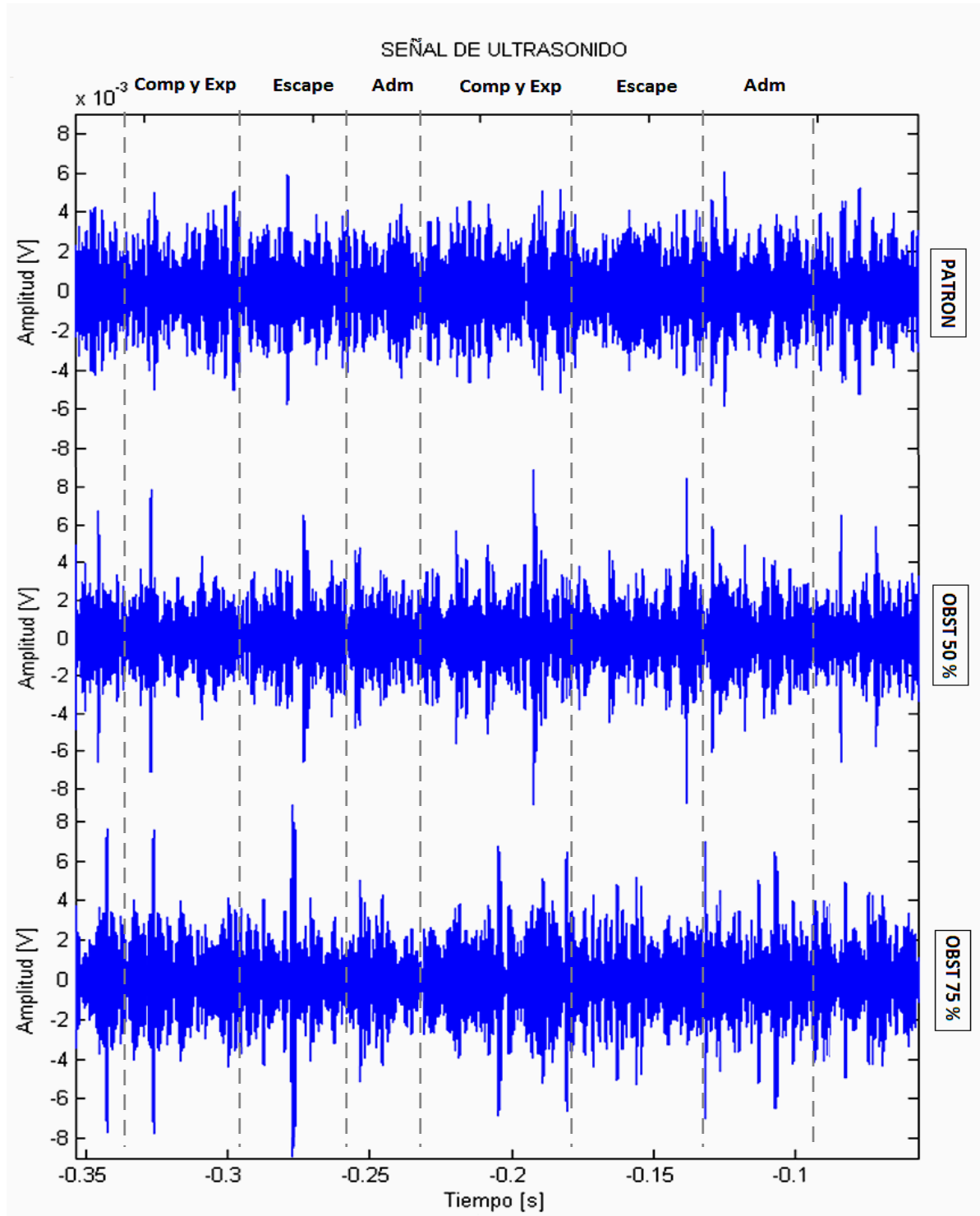
9.2.2. Señales adquiridas

Figura 44. V.V. Obstrucción en la succión 50% y 75% 1250 rpm.



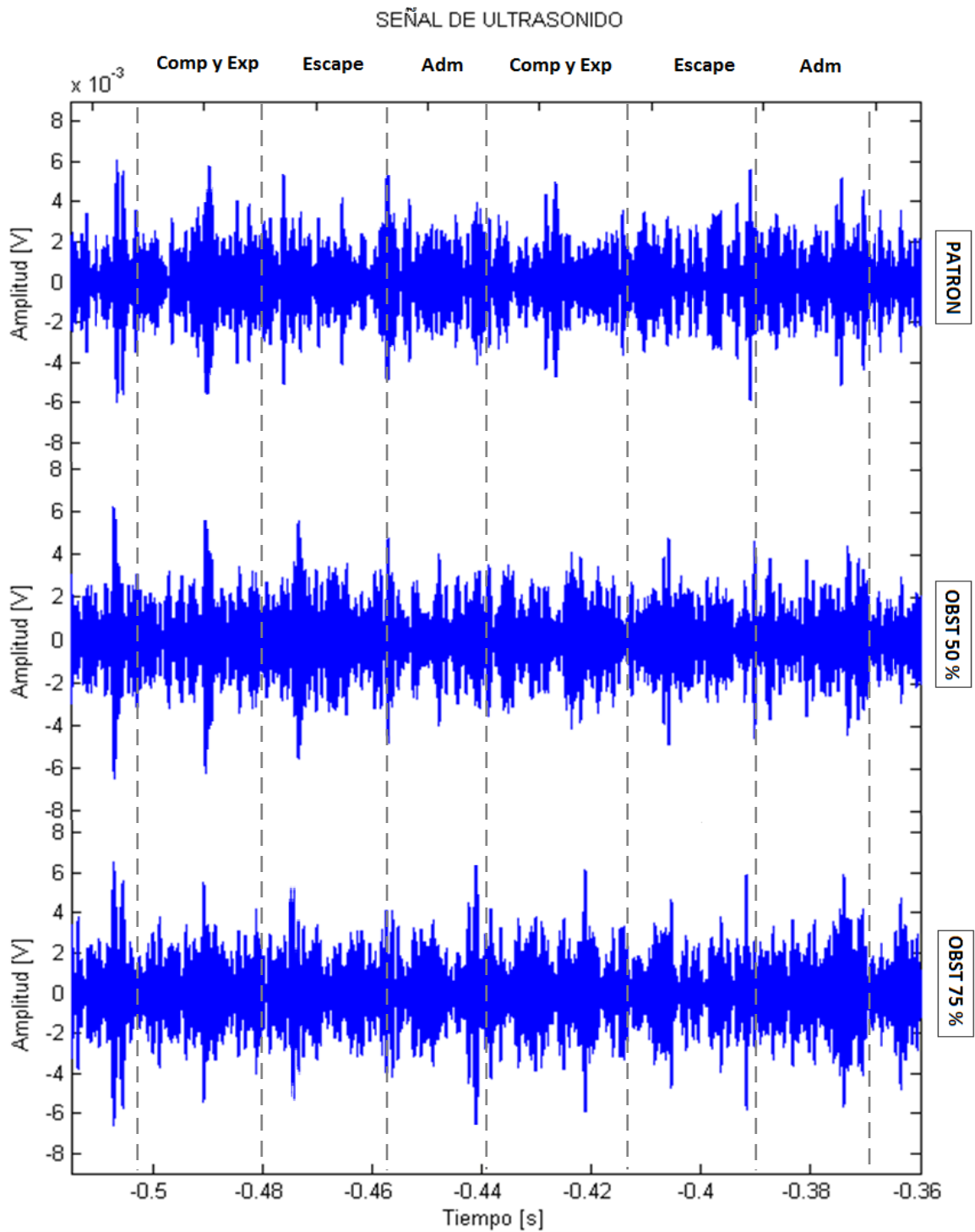
Fuente. Los autores

Figura 45. S.U. Obstrucción en la succión 50% y 75% 1250 rpm.



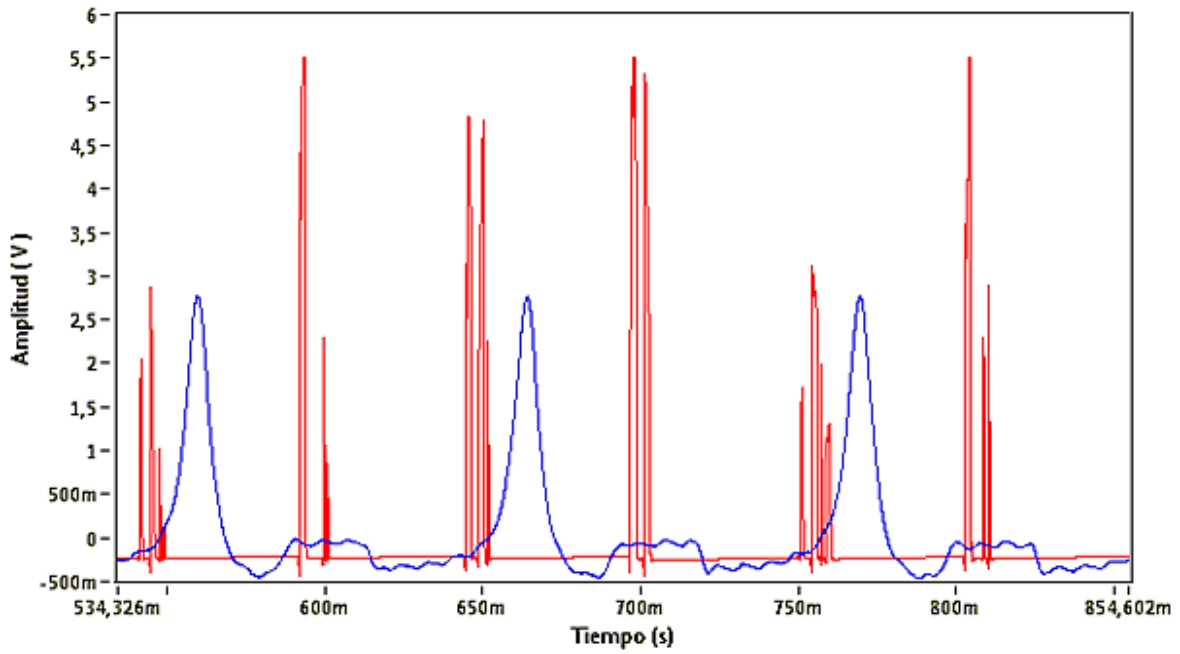
Fuente. Los autores

Figura 46. S.U. Obstrucción en la succión 50% y 75% 2000 rpm.



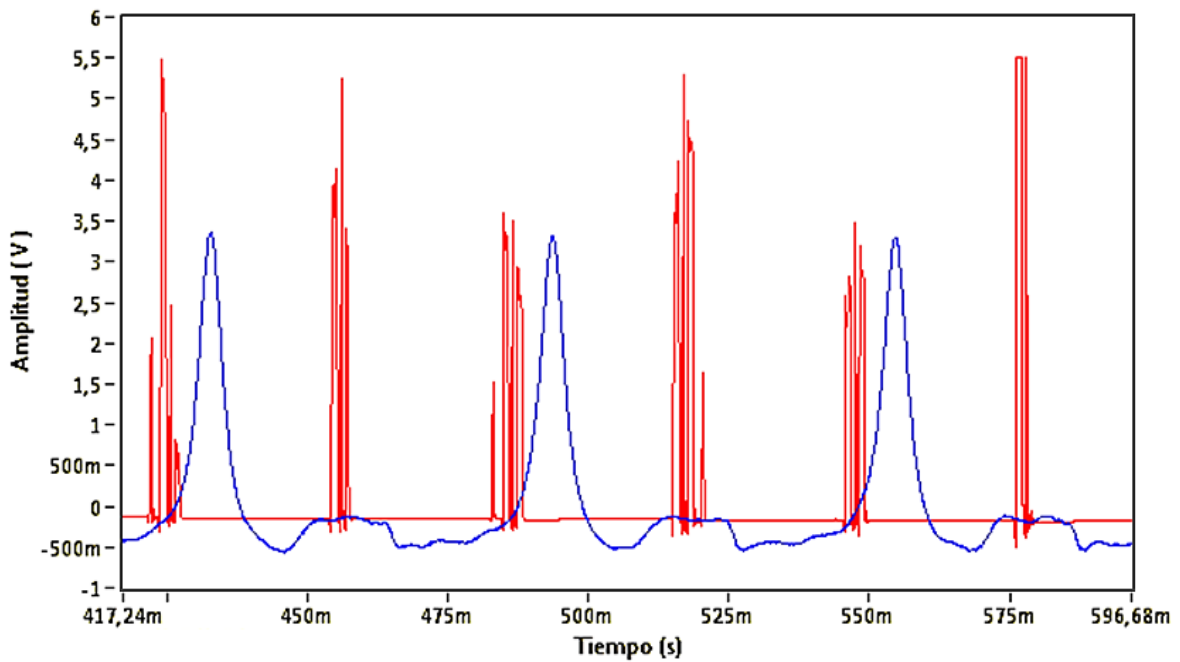
Fuente. Los autores

Figura 47. S. Presión: Obstrucción en la succión 75% 1250 rpm.



Fuente. Los autores

Figura 48. S. Presión: Obstrucción en la succión 75% 2000 rpm.



Fuente. Los autores

La tabla 4 muestra las temperaturas promedio en cada uno de los cilindros durante las pruebas de obstrucción en la succión de los gases de combustión:

Tabla 6. Temperaturas de las pruebas de obstrucción en la succión.

PRUEBA	TEMPERATURAS				
	T1	T2	T3	T4	Tprom
Obstrucción del 50% en la succión a 1250 rpm.	437	316	422	327	376
Obstrucción del 75% en la succión a 1250 rpm.	426	328	419	322	374
Obstrucción del 50% en la succión a 2000 rpm.	527	397	508	382	454
Obstrucción del 75% en la succión a 2000 rpm.	502	366	495	399	441

9.2.3 Análisis de resultados y caracterización de la falla

- En general, se observó un leve incremento en la intensidad de vibración de las señales de ultrasonido y vibración mecánica tanto para las señales a 1250 como para las de 2000 rpm, presentándose un aumento casi homogéneo en la totalidad de la señal, como se ve en las figuras 44, 45 y 46, especialmente en las señales de mayor grado de severidad, obstrucción de la succión al 75%. Esto quizás debido a que, al no poder ingresar la cantidad adecuada de aire para la combustión el motor trabaja descompensado. Sin embargo, debido a que no se detectó ningún pico característico estable, ni ninguna otra diferencia apreciable con respecto a los patrones de buen funcionamiento, se hace muy difícil la detección de esta falla mediante las técnicas utilizadas.
- Las gráficas obtenidas de las pruebas de obstrucción en la succión al 50% no presentaron un cambio significativo con respecto a los patrones de buen funcionamiento, ya que no se presentaron picos significativos en las señales que fueran representativos de esta falla. Sin embargo, las señales obtenidas de las pruebas con mayor grado de severidad, obstrucción del 75% en la succión, alcanzan a mostrar la aparición de unos pequeños picos que no están presentes en los patrones de condición normal, como se muestra en las figuras

45 y 46, aunque estos picos podrían estar relacionados con turbulencias en la apertura y cierre de válvulas causadas por ésta falla, no son señales estables, ni debidamente significativas como para poder establecer una correcta caracterización a partir de ellas.

- A pesar del incremento homogéneo en la amplitud de vibración en las señales de vibración mecánica y ultrasonido, estas no muestran una diferencia significativa con respecto al patrón de funcionamiento normal, por lo cual, no se puede establecer una caracterización adecuada para la detección de esta falla. Esto también, debido a que la intensidad de vibración del motor podía variar muy fácilmente con un leve incremento o disminución en el régimen de velocidad del motor, deshabilitando dicha variable como principio para la caracterización de las diferentes fallas.
- Las amplitudes máximas promedio que se obtuvieron en la señal de presión al inducir la falla fueron de 2,9 y 3,3 [V] en los regímenes de velocidad de 1250 y 2000 rpm respectivamente, ver las figuras 47 y 48, las cuales son muy similares a las amplitudes de los patrones de buen funcionamiento de 2,9 y 3,6 [V], en cuanto a la forma de la señal tampoco se observa variación alguna; por lo tanto, no se muestra una diferencia significativa que permita considerar que la señal de presión varíe.
- Haciendo una comparación entre las tablas 2, 3 y 4, la temperatura promedio de trabajo del motor permanece prácticamente invariable con respecto a la temperatura promedio de trabajo del motor en buen estado de funcionamiento, ya que a régimen de velocidad de 1250 rpm se obtuvieron temperaturas promedio de 376 y 374 °C para las pruebas de obstrucción en la succión al 50 y 75% respectivamente comparadas con los 373 °C de normal funcionamiento; en régimen de velocidad de 2000 rpm, se obtuvo una pequeña caída de la temperatura promedio pero parece ser no muy significativa, ya que se obtuvo

temperaturas promedio de 454 y 441 °C para las pruebas de obstrucción al 50 y 75% respectivamente comparadas con la temperatura promedio de 464 °C en el estado de buen funcionamiento, sin embargo, por la tendencia de disminución de la temperatura promedio del motor al aumentar el grado de severidad de la falla (obstrucción al 75%), quizás la inducción de esta falla esté relacionada con una pequeña caída de la temperatura promedio de operación.

9.2.4. Inducción de la falla por obstrucción en la línea de descarga

El método que se utilizó para provocar la obstrucción en la línea de descarga fue mediante el bloqueo del ducto de salida de los gases con una lámina metálica de acero, se tomaron dos niveles de severidad: primero con una obstrucción del 50% y segunda del 75% del área de salida.

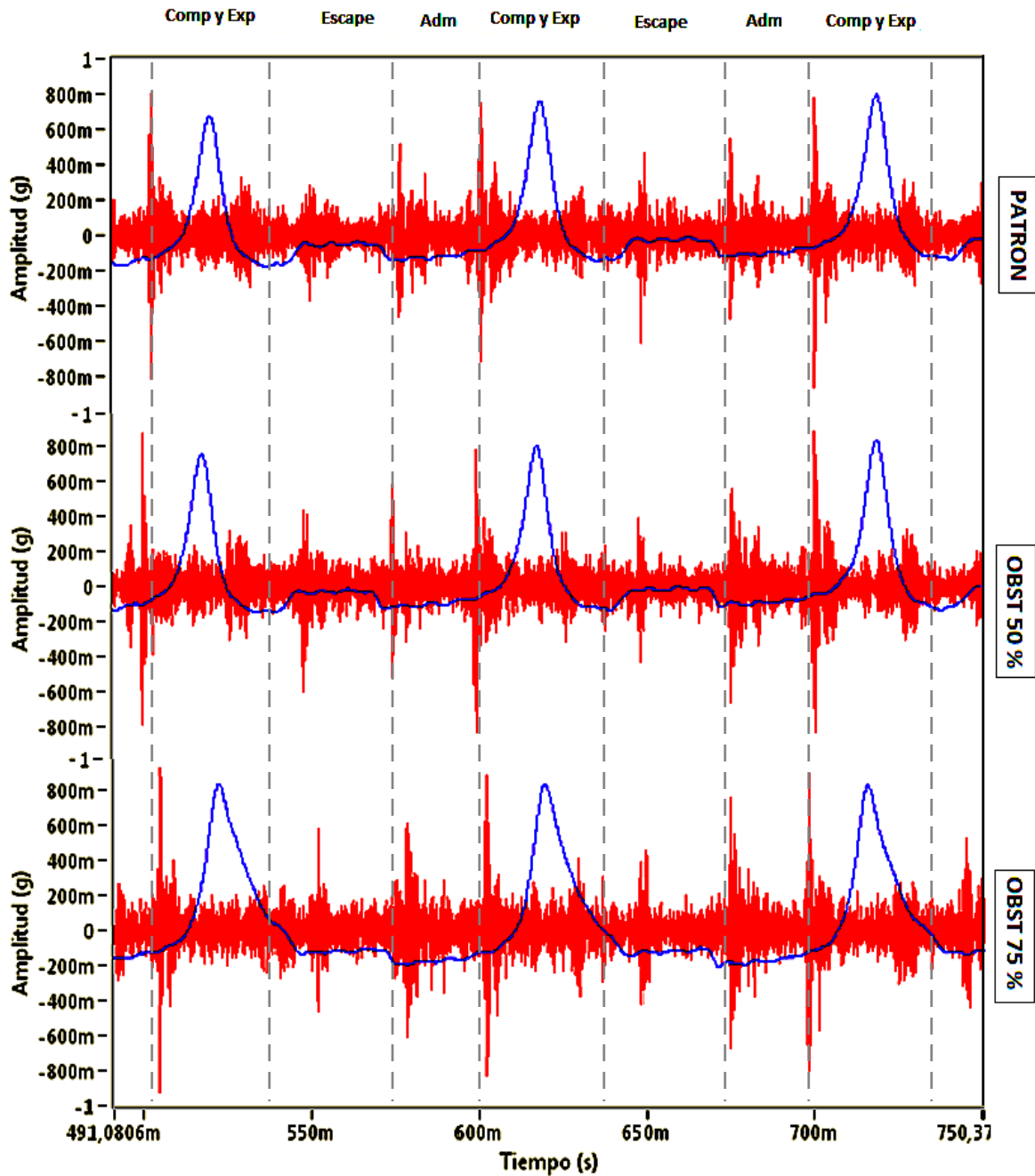
Figura 49. Inducción de la falla mediante obstrucción de la descarga.



Fuente. Los autores.

9.2.5. Señales adquiridas

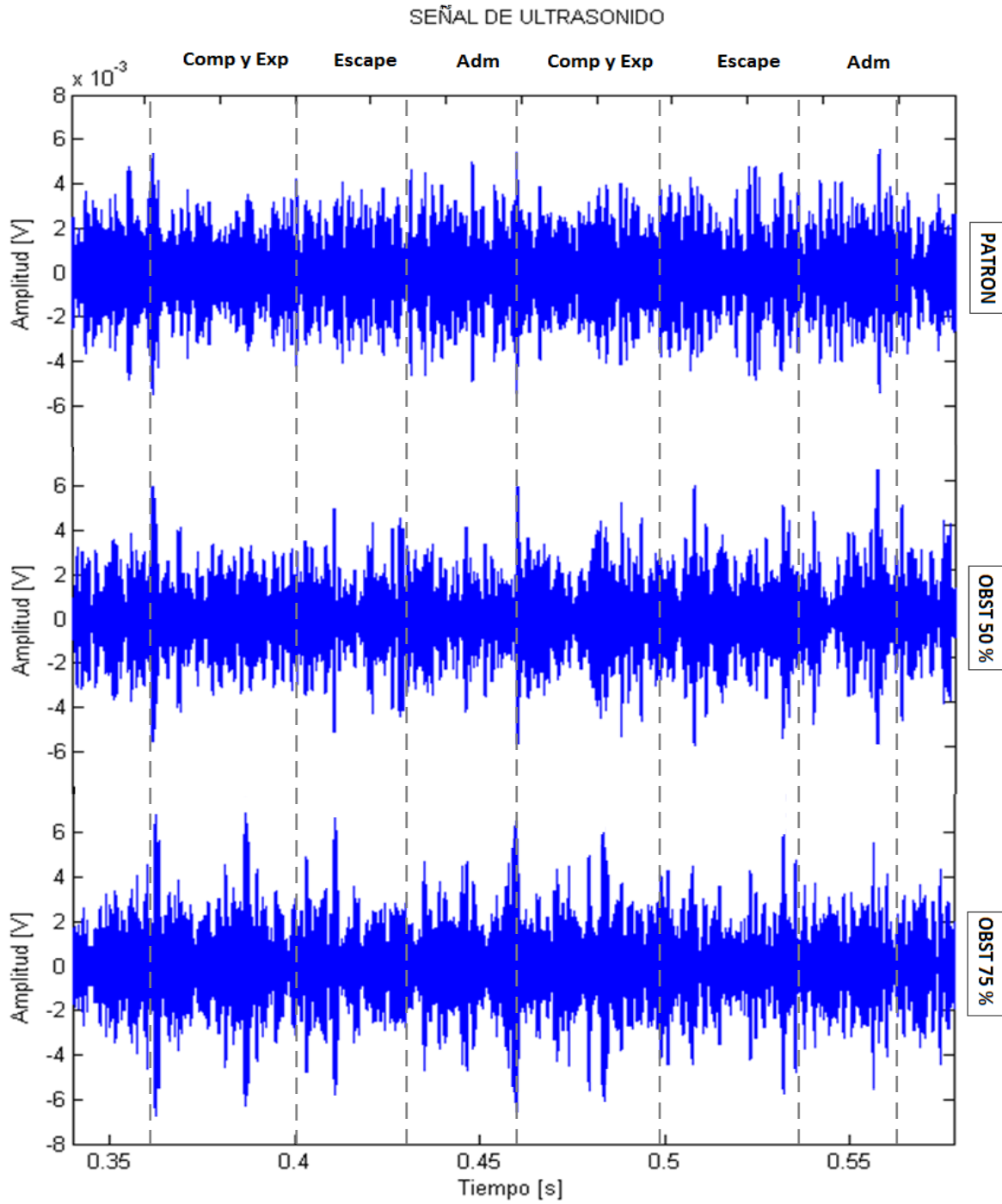
Figura 50. V.V Obstrucción en la descarga 50% y 75 % 1250 rpm.



Fuente. Los autores

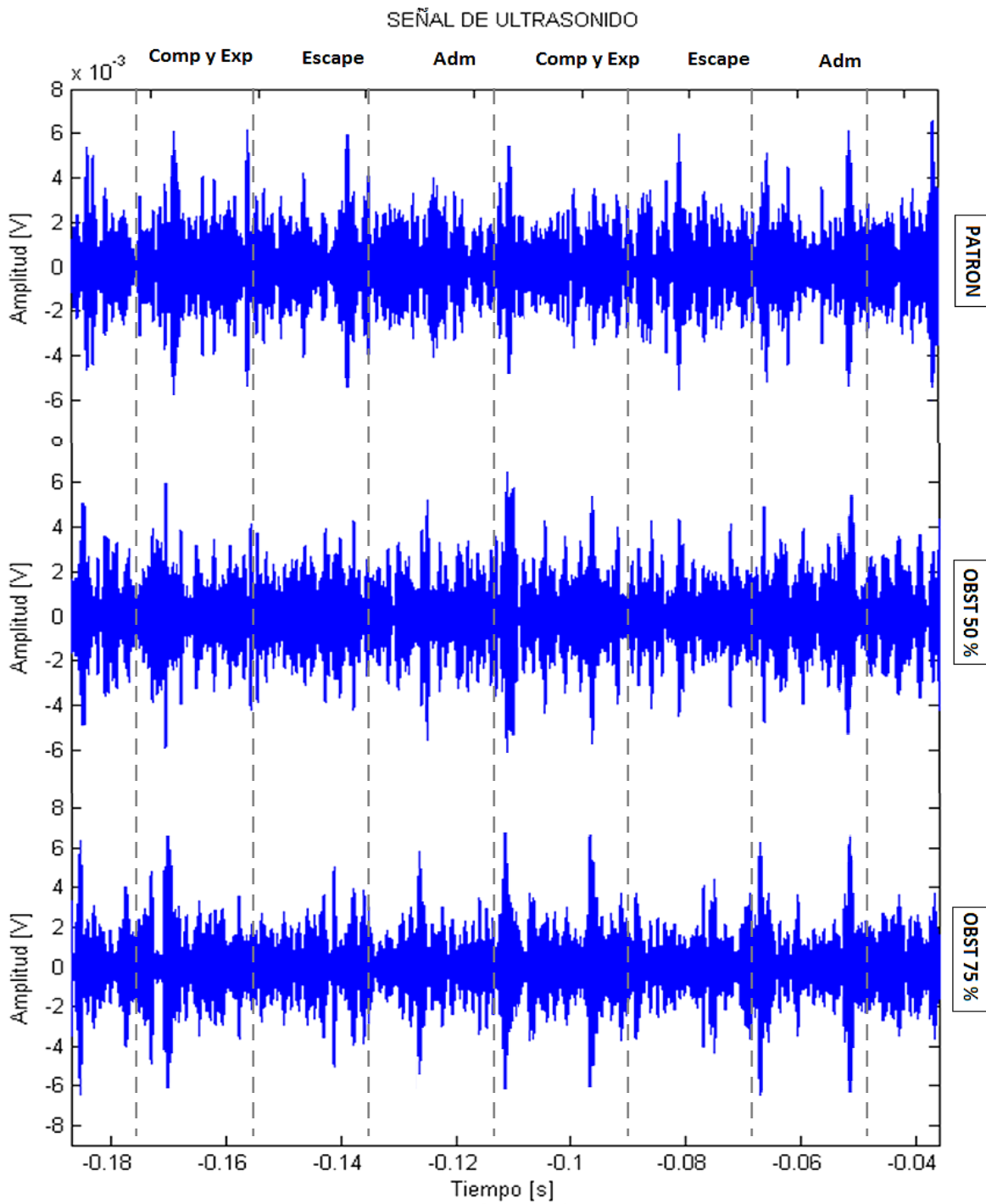
9.2.5. Señales adquiridas

Figura 51. S.U. Obstrucción en la descarga 50% y 75 % 1250 rpm.



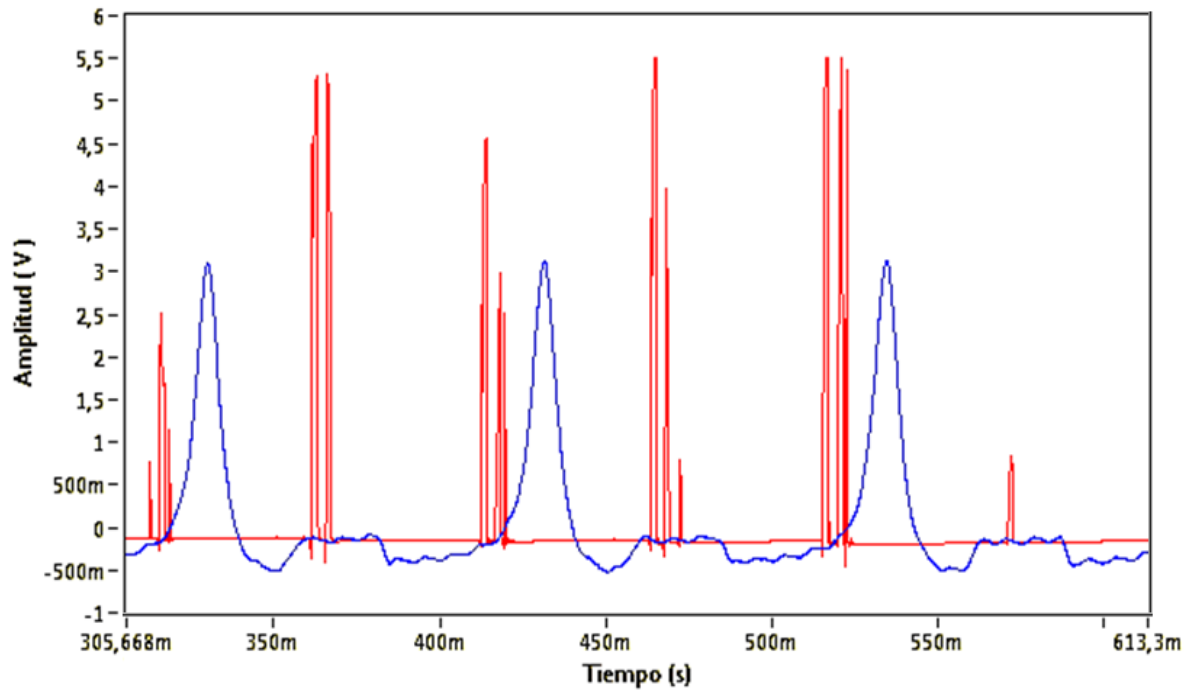
Fuente. Los autores

Figura 52. S.U. Obstrucción en la descarga 50% y 75% 2000 rpm.



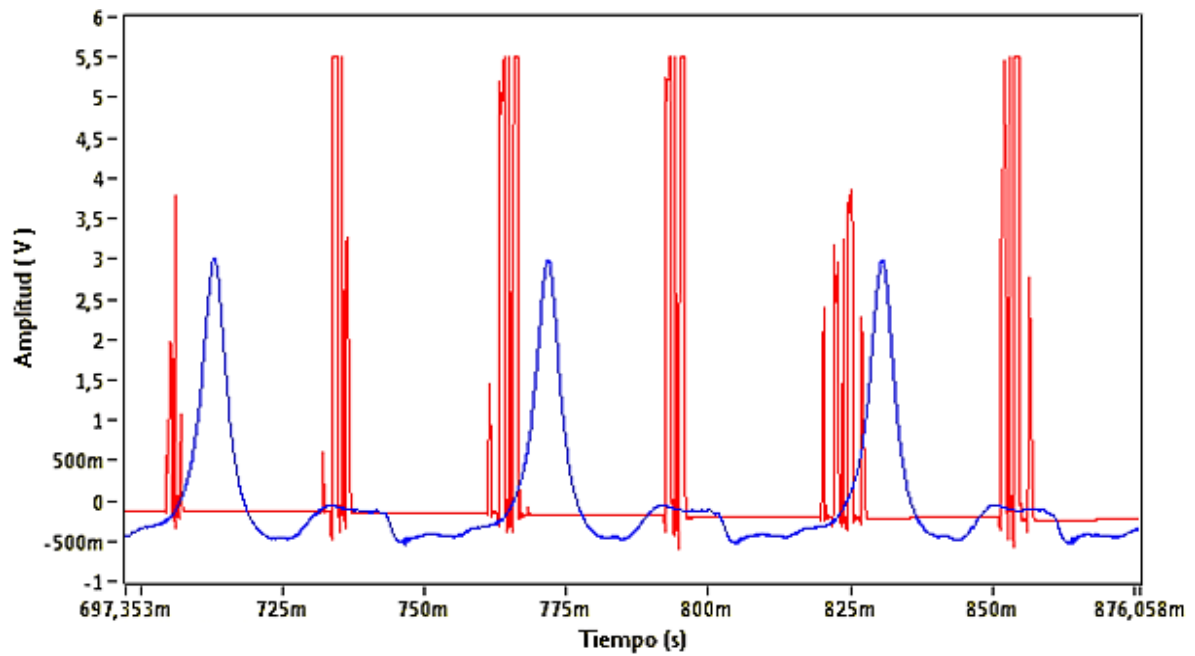
Fuente. Los autores

Figura 53. S. Presión: Obstrucción en la descarga 75% 1250 rpm.



Fuente. Los autores.

Figura 54. S. Presión. Obstrucción en la descarga 75% 2000 rpm.



Fuente. Los autores

La tabla 5 muestra las temperaturas promedio en cada uno de los cilindros durante las pruebas de obstrucción en la salida de los gases de combustión:

Tabla 7. Temperatura de las pruebas de obstrucción en la descarga.

PRUEBA	TEMPERATURAS				
	T1	T2	T3	T4	Tprom
Obstrucción en la descarga 50% a 1250 rpm.	399	287	352	306	336
Obstrucción en la descarga 75% a 1250 rpm.	353	270	318	255	299
Obstrucción en la descarga 50% a 2000 rpm.	516	404	475	291	422
Obstrucción en la descarga 75% a 2000 rpm.	532	393	505	363	448

9.2.6 Análisis de resultados y caracterización de la falla

- En general, se observó un leve incremento en la intensidad de vibración de las señales de ultrasonido y vibración tanto para las señales a 1250 como para las de 2000 rpm. Sin embargo, los patrones de falla y los de buen funcionamiento son muy parecidos entre sí, casi idénticos, por lo cual no se pudo establecer ninguna característica particular representativa de esta falla.
- Como se puede observar en las señales de ultrasonido mostradas en las figuras 51 y 52 de obstrucción en la descarga a los dos grados de severidad, 50% y 75% de obstrucción, y regímenes de velocidad de 1250 y 2000 rpm respectivamente, las señales obtenidas son muy similares a los patrones de buen funcionamiento correspondientes. Por lo cual, no se puede establecer ninguna característica particular de esta falla. Esto quizás a que, sí es que se produce alguna alteración ultrasónica al inducir esta falla, posiblemente sea de muy baja intensidad comparada con todo el ruido que genera intrínsecamente el motor, por lo cual es muy difícil su detección y caracterización.

- Las señales de vibración mecánica analizadas tampoco mostraron diferencias significativas respecto a los patrones de buen funcionamiento, ver la figura 50, sólo pudo observar un leve incremento homogéneo de toda la señal de vibración, lo cual no permite realizar ninguna caracterización adecuada de esta falla a través de las señales de vibración mecánica. Esto debido a que la intensidad de vibración del motor podía variar muy fácilmente con un leve incremento o disminución en el régimen de velocidad del motor, deshabilitando dicha variable como principio para la caracterización de las diferentes fallas.
- Las amplitudes máximas promedio que se obtuvieron en la señal de presión al inducir la falla fueron de 2,95 y 3,25 [V] en los regímenes de velocidad de 1250 y 2000 rpm respectivamente, ver las figuras 53 y 54, las cuales son muy similares a las amplitudes de los patrones de buen funcionamiento de 2,9 y 3,6 [V], en cuanto a la forma de la señal tampoco se observa variación alguna; por lo tanto, no se muestra una diferencia significativa que permita considerar que la señal de presión varíe.
- Haciendo una comparación entre las tablas 2, 3 y 5, se aprecia una caída significativa de la temperatura promedio de operación del motor en cada una de las pruebas de falla realizadas, tanto en régimen de velocidad de 1250 y 2000 rpm, presentándose una caída de la temperatura promedio de operación del motor de 37 y 74 °C en las pruebas de obstrucción en la descarga al 50 y 75% respectivamente en régimen de velocidad de 1250 rpm; y una caída de la temperatura promedio de operación del motor de 42 y 16 °C para obstrucción al 50 y 75% respectivamente en régimen de velocidad de 2000 rpm. Los anteriores resultados sugieren que la falla por obstrucción en la línea de descarga está directamente relacionada con una caída considerable en la temperatura promedio de operación del motor.

10. FALLA POR ADELANTO EN EL ENCENDIDO DE LA MEZCLA

10.1. PRINCIPIOS TEÓRICOS

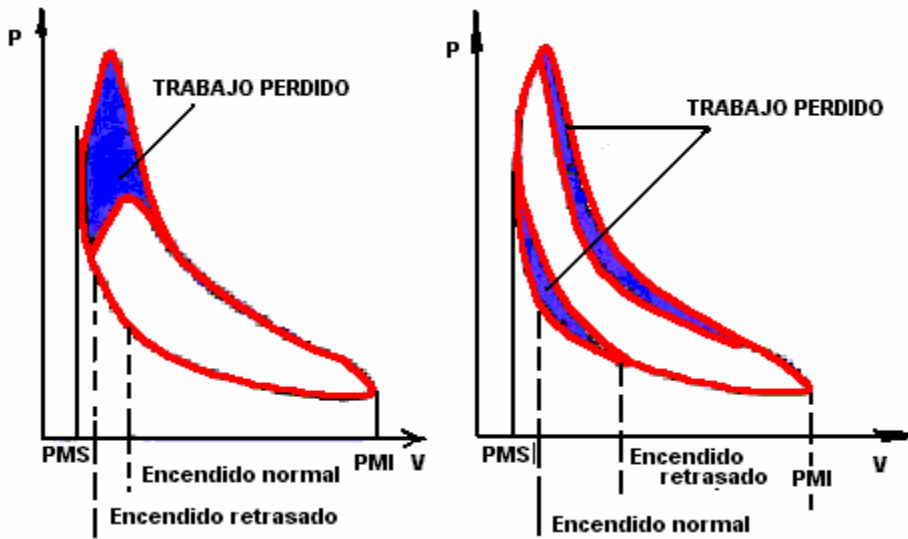
En los motores Otto, el sistema de ignición consiste en un componente llamado bobina de encendido, que es un auto-transformador de alto voltaje al que está conectado un conmutador que interrumpe la corriente del primario para que se induzca un impulso eléctrico de alto voltaje en el secundario.

Dicho impulso está sincronizado con la etapa de compresión de cada uno de los cilindros; el impulso se lleva al cilindro correspondiente (aquel que está comprimido en ese momento) utilizando un distribuidor rotativo y unos cables de grafito que dirigen la descarga de alto voltaje a la bujía. El dispositivo que produce la ignición es la bujía que, fijado en cada cilindro, dispone de dos electrodos separados unas décimas de milímetro, entre los cuales el impulso eléctrico produce una chispa, que inflama el combustible. La falla que se menciona a continuación se presenta cuando en el motor se pierde la sincronía en el encendido de la mezcla, generando un encendido en adelanto o en atraso.

Detección de la falla

Para detectar una falla debida al adelanto o atraso en el encendido se requiere la observación detallada del diagrama mostrado en la figura 55, el cual muestra el comportamiento del mismo respecto a la variación del momento del encendido. En éste está señalado el punto correspondiente al encendido de la carga. Dicho encendido debe efectuarse antes del P.M.S., a fin de que la combustión, que necesita un cierto tiempo para realizarse, se parezca cuanto sea posible a la fase teórica, esto es, casi a volumen constante.

Figura 55. Diagramas para encendido normal y encendido adelantado.



Fuente. ROSAS SARMIENTO, Guillermo. Estudio de vibraciones mecánicas en máquinas reciprocantes. Proyecto de grado para obtener título de Ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. 2004. p. 295.

El tiempo de encendido se establece experimentalmente hallando, por medio de pruebas, el valor correspondiente a la potencia máxima que se puede obtener sin llegar a la detonación o funcionamiento violento del motor. Por lo general, el instante en que salta la chispa corresponde al punto en que la presión equivale a la mitad de la que se alcanza en el P.M.S. Si la chispa salta con retraso, casi toda la combustión se desarrolla después del P.M.S. La presión máxima se alcanza cuando el pistón se ha deslizado notablemente hacia el P.M.I y su valor es, por tanto, más bajo que el normal. La superficie del ciclo se reduce, según se representa en el figura anterior (a).

La misma deformación del diagrama indicado se produce en el caso de una combustión lenta. Cuando, por al contrario, la chispa salta con anticipo, la combustión ocurre en gran parte antes del P.M.S., la presión máxima es superior a la normal y el ciclo aparece deformado, como puede observarse en la figura 86

(b). Como muestra la figura 55, en ambos casos se reduce el rendimiento ya que hay una pérdida de trabajo con respecto al encendido óptimo.

10.2. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

10.2.1. Inducción de la falla por adelante en el encendido

El método por el cual se generó esta falla fue mediante la manipulación de la bobina de encendido. Este elemento tiene una señalización de la posición óptima de funcionamiento, y permite ser girada en ambas direcciones, produciendo un adelanto o un atraso en el encendido de la mezcla dependiendo de la dirección.

La falla por adelanto en el encendido de la mezcla se trabajó para dos grados de severidad, el primero, girando la bobina de encendido un ángulo de 15 grados y el segundo con un ángulo de 25 grados, en dirección horaria con respecto a la posición de buen funcionamiento para generar el adelanto en la ignición de la mezcla, como se muestra en la figura 87.

Figura 56. Inducción de la falla mediante giro de la bobina de encendido.

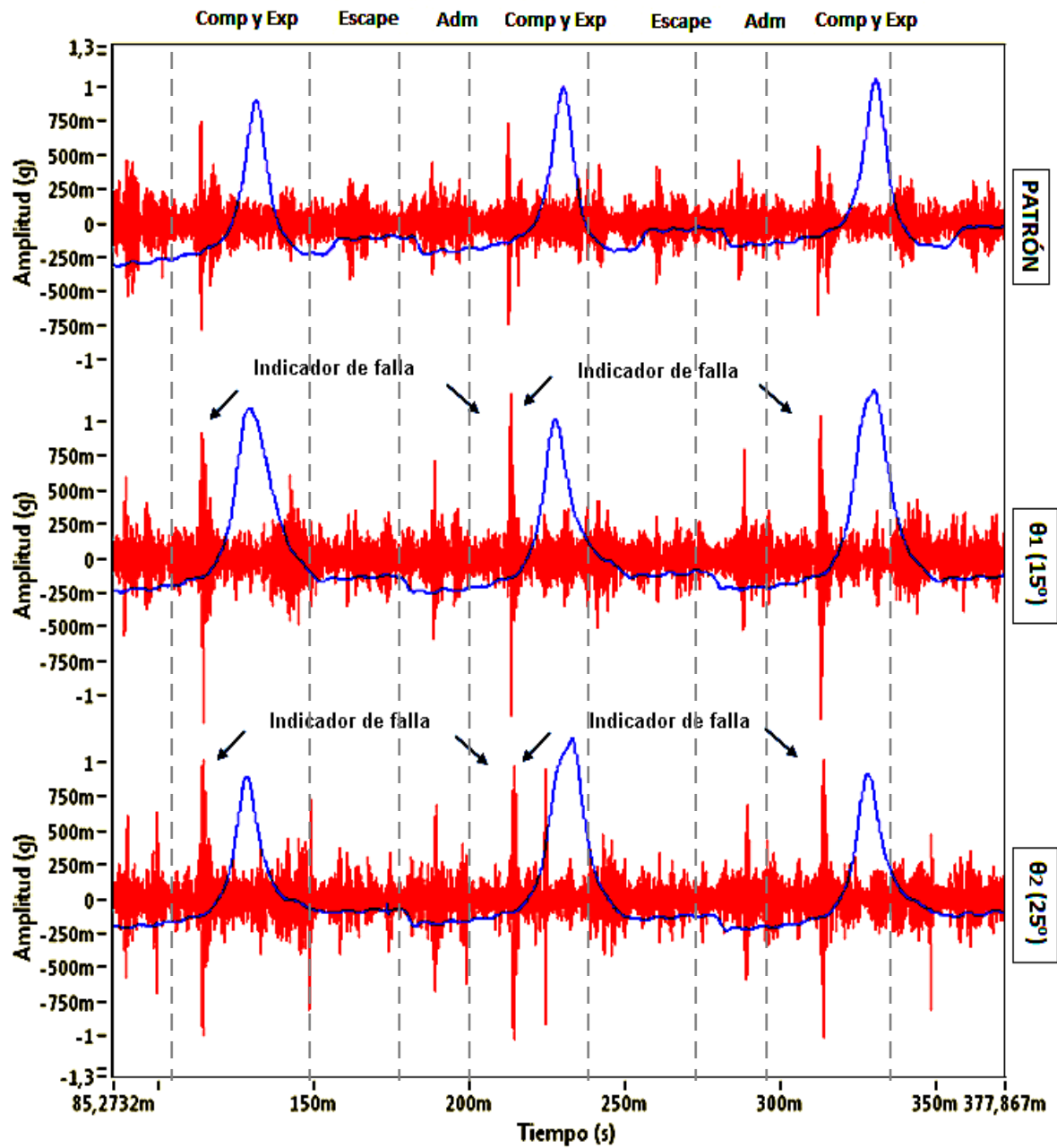


Fuente. Los autores.

10.2.2. Señales adquiridas

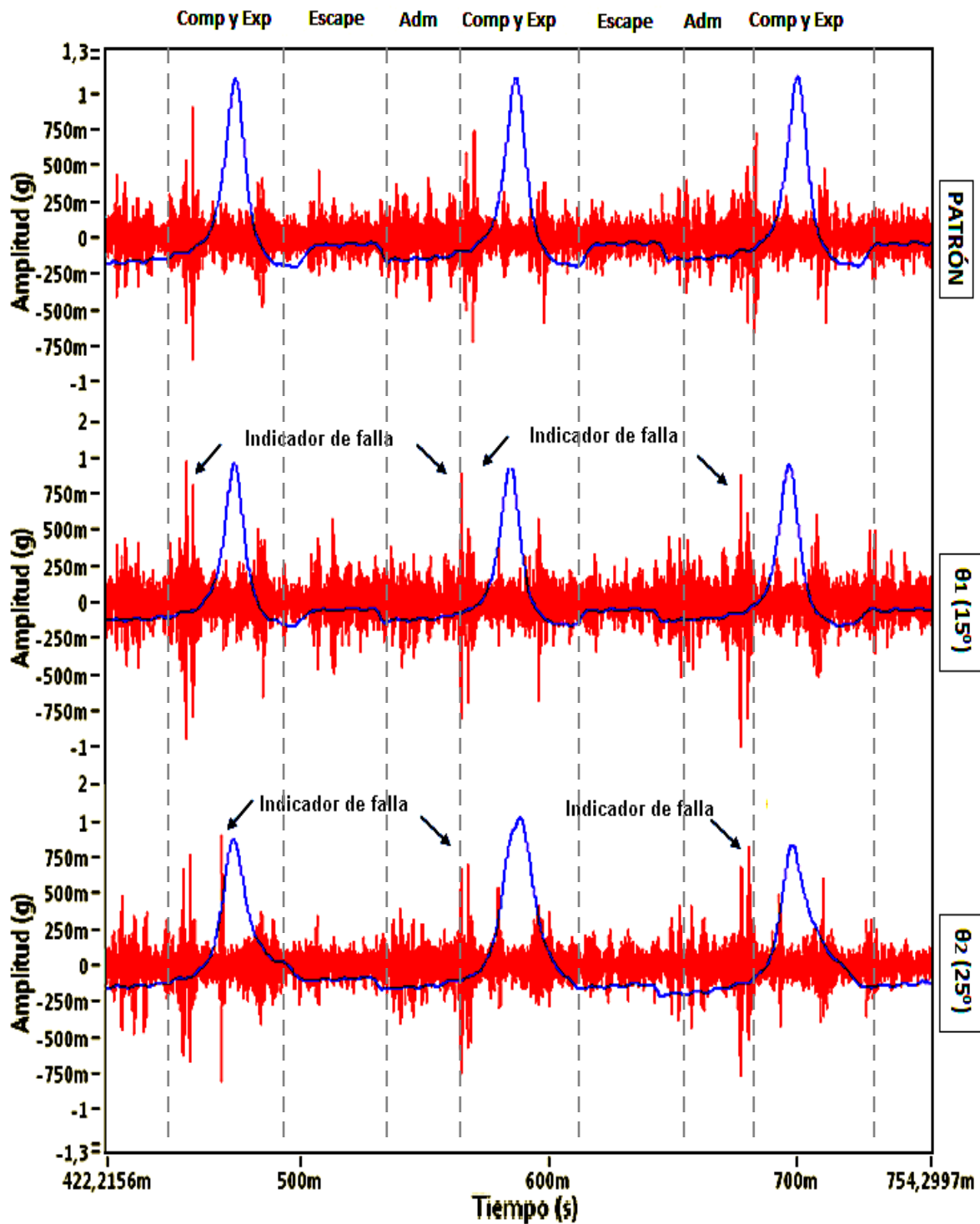
10.2.2.1. Señales a 1250 rpm

Figura 57. V.V. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm.



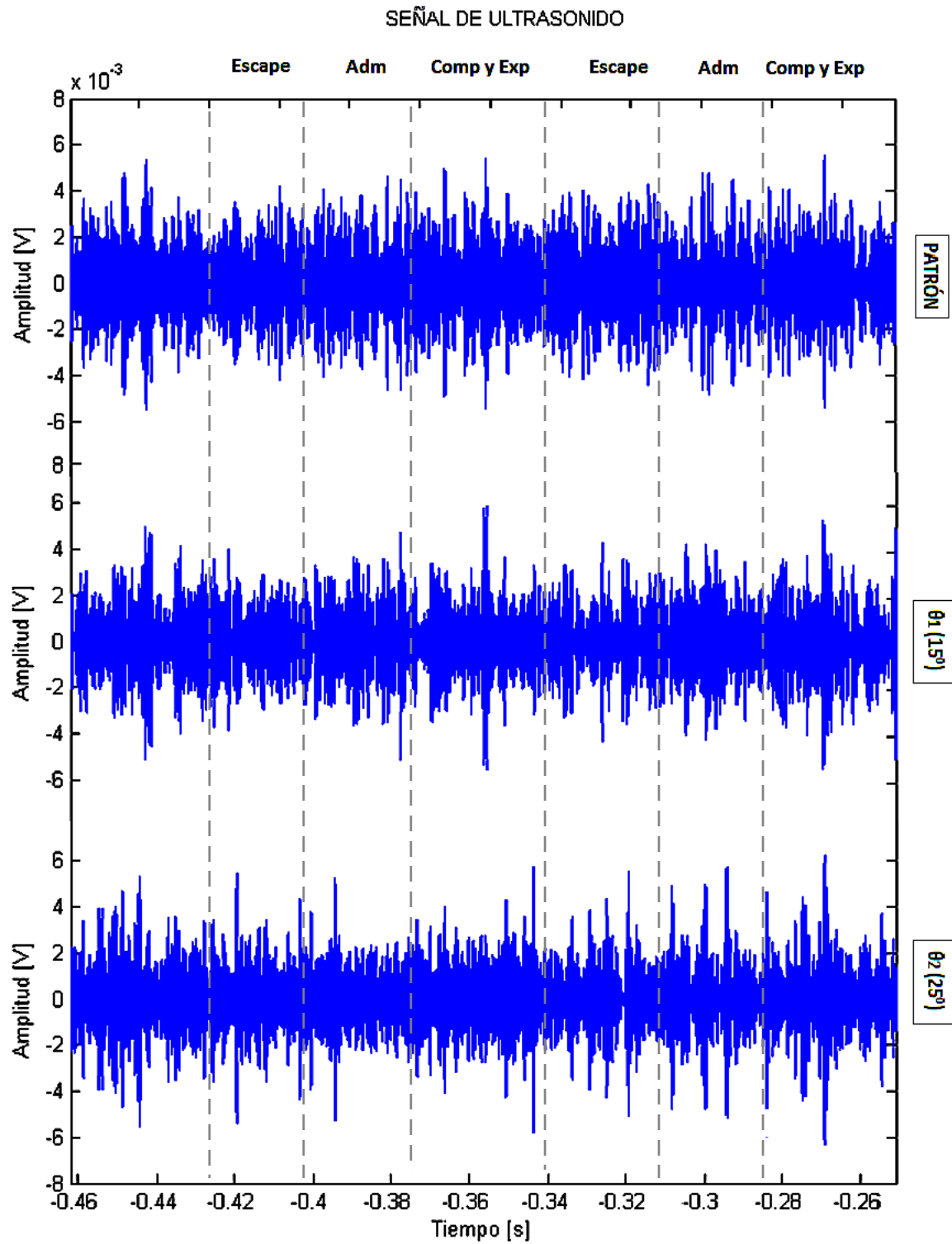
Fuente. Los autores.

Figura 58. V.H. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm



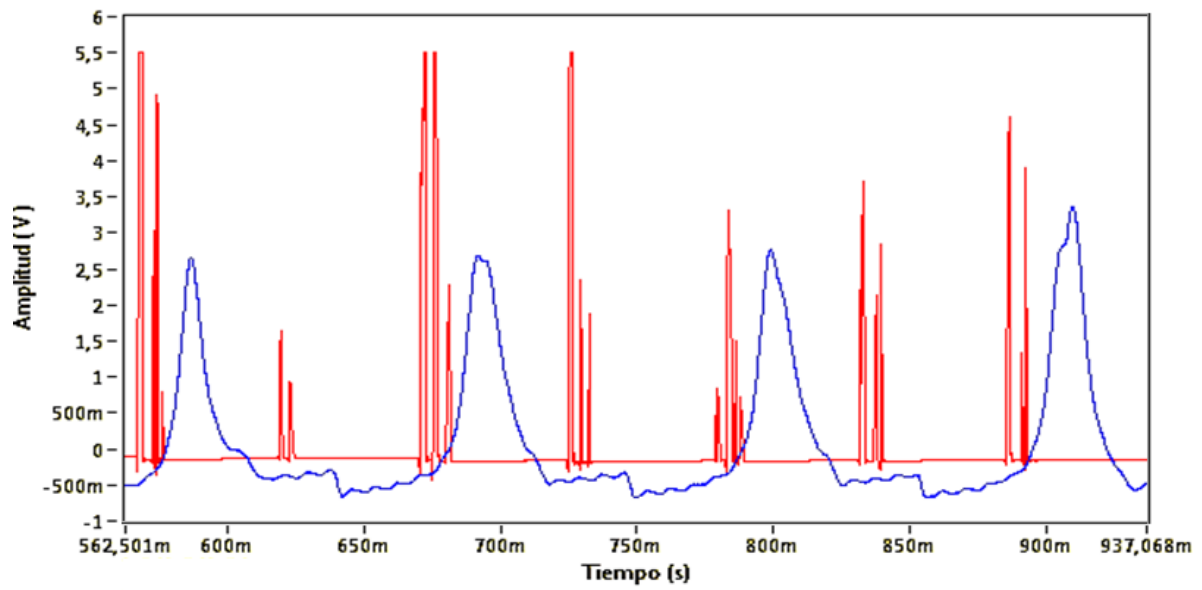
Fuente. Los autores.

Figura 59. S.U. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm.



Fuente. Los autores

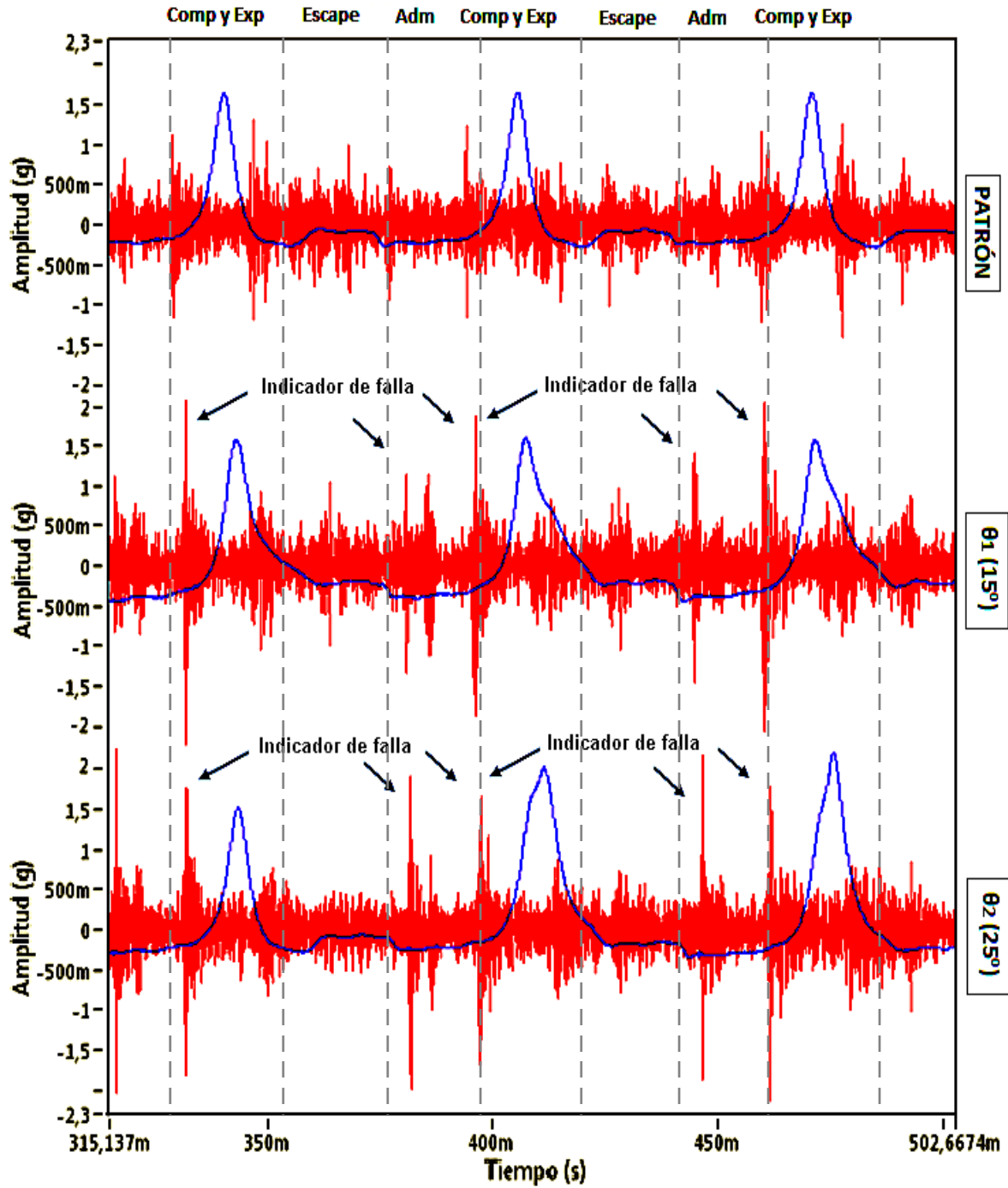
Figura 60. S. Presión. Adelanto del encendido $\theta_2 = 25^\circ$ a 1250 rpm.



Fuente. Los autores.

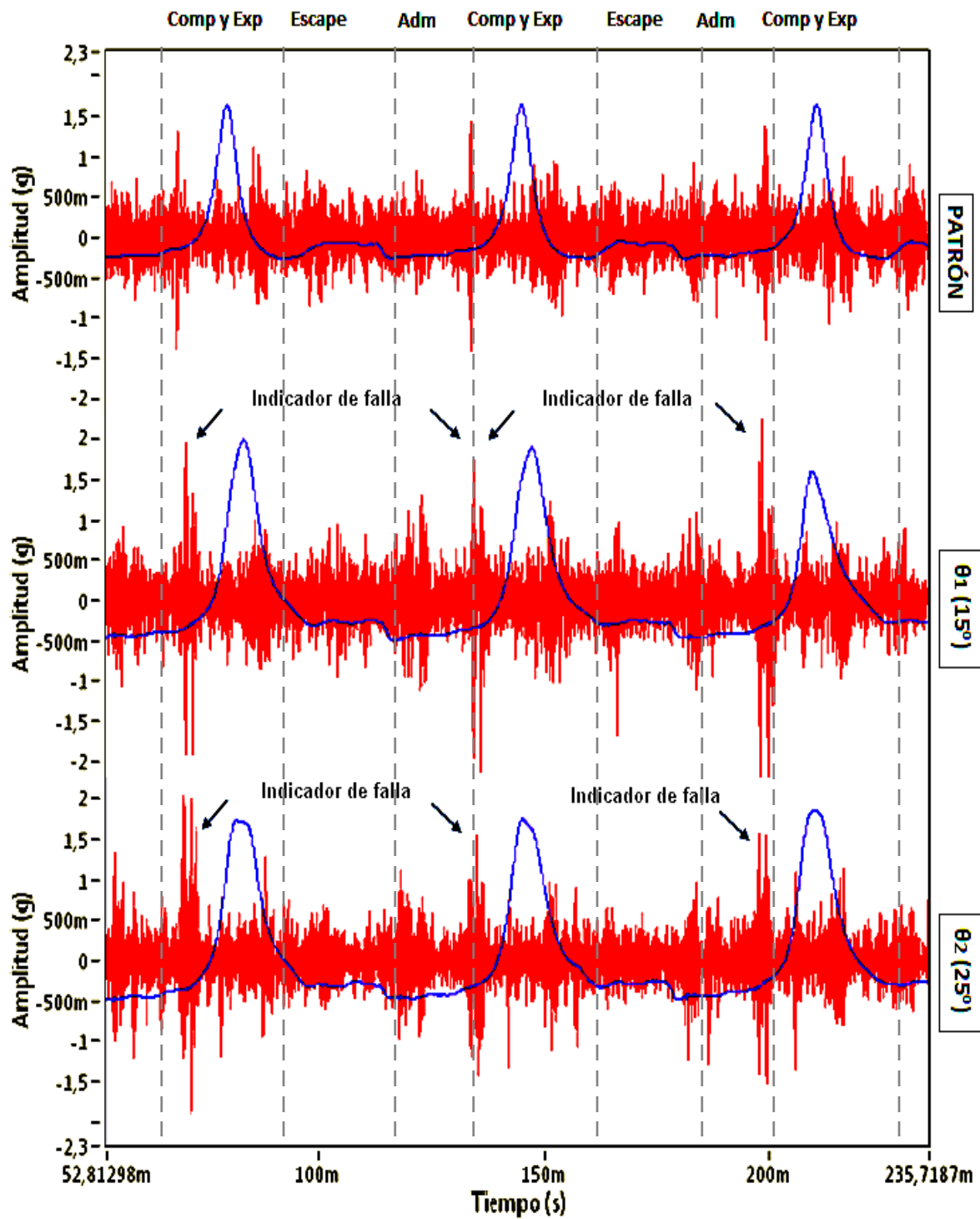
10.2.2.2. Señales a 2000 rpm

Figura 61. V.V Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 2000 rpm.



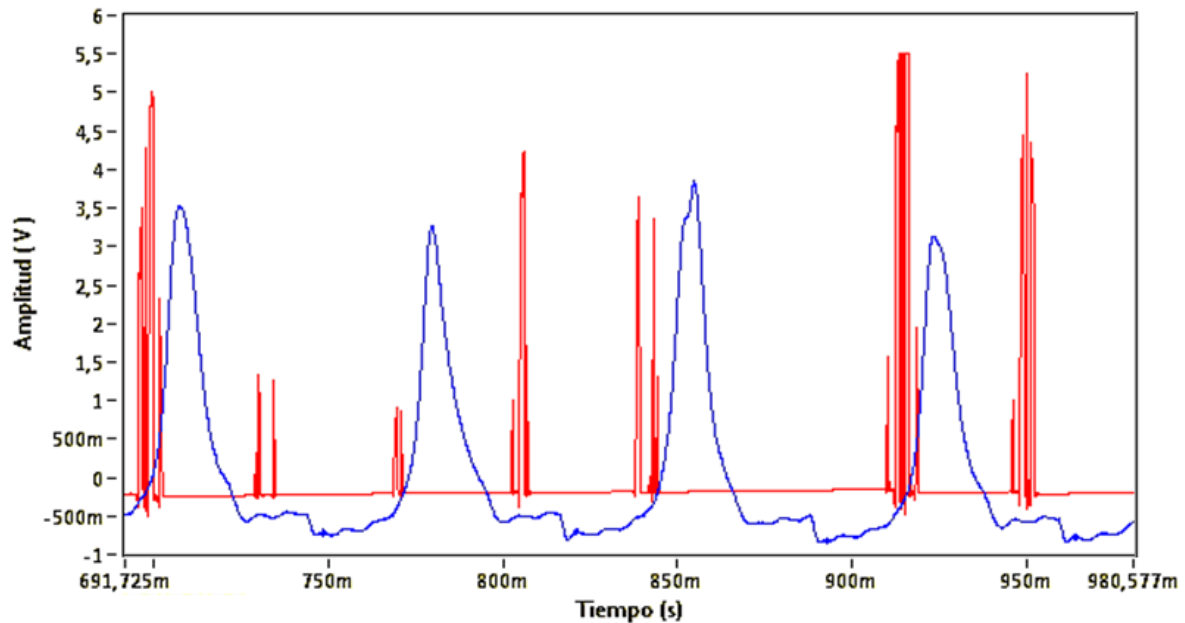
Fuente. Los autores.

Figura 62. V.H. Adelanto del encendido $\theta_1 = 15^\circ$ y $\theta_2 = 25^\circ$ a 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

Figura 63. S. Presión. Adelanto del encendido $\theta_2 = 25^\circ$ a 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

La tabla 8 muestra las temperaturas promedio en cada cilindro durante las pruebas de adelanto en el encendido de la mezcla:

Tabla 8. Temperaturas de las pruebas de adelanto en el encendido.

PRUEBA	TEMPERATURAS				
	T1	T2	T3	T4	Tprom
Adelanto del encendido $\theta_1=15^\circ$ 1250 rpm.	379	294	339	355	342
Adelanto del encendido $\theta_2=25^\circ$ 1250 rpm.	379	264	347	397	347
Adelanto del encendido $\theta_1=15^\circ$ 2000 rpm.	528	420	480	548	494
Adelanto del encendido $\theta_2=25^\circ$ 2000 rpm.	521	412	456	532	480

10.2.3. Análisis de resultados y caracterización de la falla

- En general, la inducción de ésta falla genera un leve incremento en la intensidad de vibración de todo el motor. Aunque el comportamiento de las señales de vibración tanto en la dirección vertical como horizontal es muy

semejante al encontrado en los patrones de buen funcionamiento, se puede observar casi en la totalidad de las gráficas, un incremento con respecto a la estela de ruido, en la amplitud de los principales picos de las señales de vibración respecto a la condición normal de funcionamiento, especialmente en los dos picos de mayor amplitud, localizados uno al inicio de la etapa de admisión y el otro, de aún mayor amplitud, localizado al final de la etapa de admisión de cada ciclo; motivo por el cual estos picos fueron señalados con la flecha de indicador de falla como muestran las figuras 57, 58, 61 y 62. Este fenómeno es bastante difícil de ser detectado ya que en cuanto a forma no se presentó una variación característica significativa, sin embargo, el incremento en la amplitud de los dos picos mencionados es más fácil de detectar a altas velocidades, en régimen de velocidad de 2000 rpm y en las gráficas de vibración horizontal como se puede observar en la figura 62 comparada con el patrón de buen funcionamiento en el cual no se observa ningún pico.

- En la señal de ultrasonido también se alcanza a detectar un fenómeno muy similar al encontrado en las señales de vibración mecánica, ya que igualmente, aparecen dos picos sobresalientes al lado derecho de las gráficas, y que parecen coincidir con la ubicación de los picos que aumentaron su intensidad de vibración en la señal de vibración mecánica, ver la figura 59. Lo cual corrobora la hipótesis de que esos dos picos están relacionados con la aparición de ésta falla, y que una descalibración en la bobina de encendido con adelanto en el encendido de la mezcla, genera una excitación de los dos picos mencionados.
- La señal de presión también es muy confiable para la detección de esta falla, adelanto en el encendido de la mezcla. Las figuras 57, 58 y 60 a 63, muestran claramente un patrón particular en la señal de presión, en estas figuras se observa la aparición de deformidades en la curva de presión, achataduras en la punta, cerca de la presión máxima, y adelgazamiento de la curva en la región

posterior al pico máximo de presión. Además, también se observa una pequeña reducción en la amplitud máxima de las señales de presión, ya que se obtuvieron picos de amplitud máxima promedio de 2,8 y 3,2 [V], en comparación con los 2,9 y 3,6 [V] del patrón de referencia de buen funcionamiento.

- Además, la señal de presión también muestra una variación extrema en su forma comparada con el patrón de buen funcionamiento, tanto en la zona de descarga (primera zona de baja presión después del domo) como en la de admisión (zona de baja presión antes del siguiente domo), ya que aunque la primera zona se mantiene casi estable a una presión de aproximadamente de -500 [mV] como en la condición normal, la segunda en lugar de aumentar la presión levemente, muestra una caída de presión bastante fuerte hasta cerca de -800 [mV], ver las figuras 60 y 63, lo cual es anormal y característico de esta falla, observándose en todas las señales de presión independiente del régimen de velocidad y aumentando al aumentar el grado de severidad de la falla, es decir, con un ángulo de 25 grados con respecto a la posición normal.
- Haciendo una comparación entre las tablas 2,3 y 6, no se pudo concluir nada específico en cuanto al comportamiento de la temperatura promedio del motor en operación al inducir la falla de adelanto en el encendido de la mezcla y las temperaturas promedio de buen funcionamiento del motor, ya que en régimen de velocidad de 1250 rpm se aprecia una fuerte caída en la temperatura promedio de los gases de escape en los dos grados de severidad de la falla, rotación de un ángulo de $\theta_1=15^\circ$ y $\theta_2=25^\circ$ de la bobina de encendido del motor, presentando caídas de temperatura de alrededor de 30 °C en cada una de estas; mientras que en régimen de velocidad de 2000 rpm sucede lo contrario, se observa un incremento de la temperatura promedio de motor de alrededor de 25 °C en los dos grados de severidad analizados, con respecto a la temperatura promedio de funcionamiento del motor.

11. FALLA POR DESCALIBRACIÓN EN LA APERTURA DE LAS VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

11.1. PRINCIPIOS TEÓRICOS

Las válvulas son obturadores sometido a la presión de un resorte; y cuyo movimiento sirve para regular la entrada y salida de gases al cilindro, cerrando herméticamente los conductos de acceso y evacuación de la cámara de combustión durante diferentes instantes del ciclo del motor.

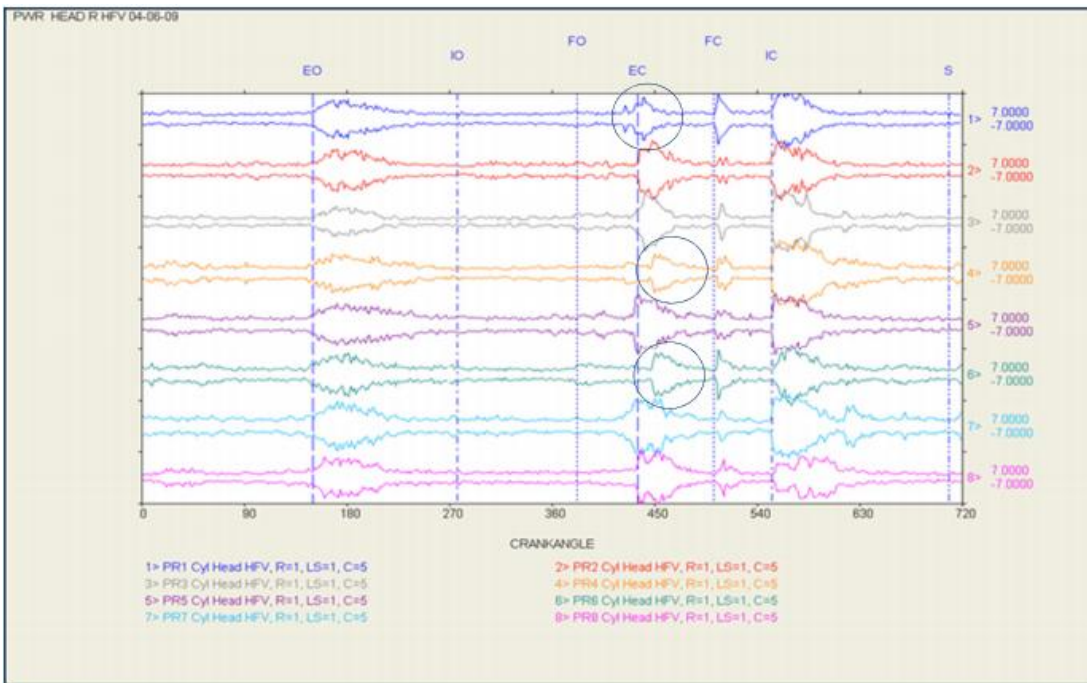
El mal funcionamiento en la apertura y cierre de válvulas trae como consecuencia una gran pérdida de rendimiento. Por ejemplo, si los conductos de la mezcla o del aire son insuficientes y ofrecen excesiva resistencia, o bien se ha retardado el principio de la abertura de la válvula de aspiración, la presión en el cilindro durante la carrera de aspiración es inferior a la normal y, por tanto, aumenta el trabajo de bombeo reduciendo el trabajo útil.

Por otro lado, si son los conductos de escape los que ofrecen resistencia anormal al paso de los gases, o bien se atrasa el principio de abertura de la válvula de escape, la presión en el cilindro es superior a la normal durante la carrera de expulsión; por tal motivo, no solo aumenta el trabajo de bombeo, sino que resulta además excesiva la cantidad de gases de combustión que permanecen en el cilindro al término de la carrera y, por tanto, excesiva también la dilución de la carga fresca que se introduce durante la siguiente fase de aspiración.

Detección de la falla

Para detectar cualquier descalibración en el tren de válvulas, se deben tener todas las señales referenciadas de acuerdo a la posición angular del cilindro, preferiblemente, se deben trazar líneas punteadas para indicar la apertura y cierre de válvulas, como se muestra en la Figura 64.

Figura 64. Detección de válvulas de escape ligeramente descalibradas.



Fuente. WOODGROUP. Análisis de motores recíprocos. Memorias: Congreso de vibraciones mecánicas. Universidad Pontificia Bolivariana, 2012. p. 41.

11.2. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

11.2.1. Inducción de la falla por descalibración de válvulas de admisión

El método que se utilizó para producir esta falla fue mediante la manipulación de los tornillos reguladores de las válvulas. Al aflojar estos tornillos, se genera un retraso en el accionamiento mecánico de la válvula, ya que la leva tarda más

tiempo en alcanzar el mecanismo. En el estado de buen funcionamiento se realizó la calibración de todas las válvulas utilizando el instrumento de calibración de éstas (una galga calibrada), con lo cual se especificó la holgura adecuada de aproximadamente 0,5 mm. Para inducir la falla en la válvula, se incrementó la holgura de ésta a un total de aproximadamente 2 mm, con lo cual, aún no se percibía un cambio significativo en el comportamiento del motor a simple vista, pero, que sí pudiera ser detectada la falla mediante las técnicas de vibraciones y ultrasonido. Las pruebas se realizaron para cada una de las válvulas de aspiración en los dos regímenes de velocidad estudiados, 1250 y 2000 rpm.

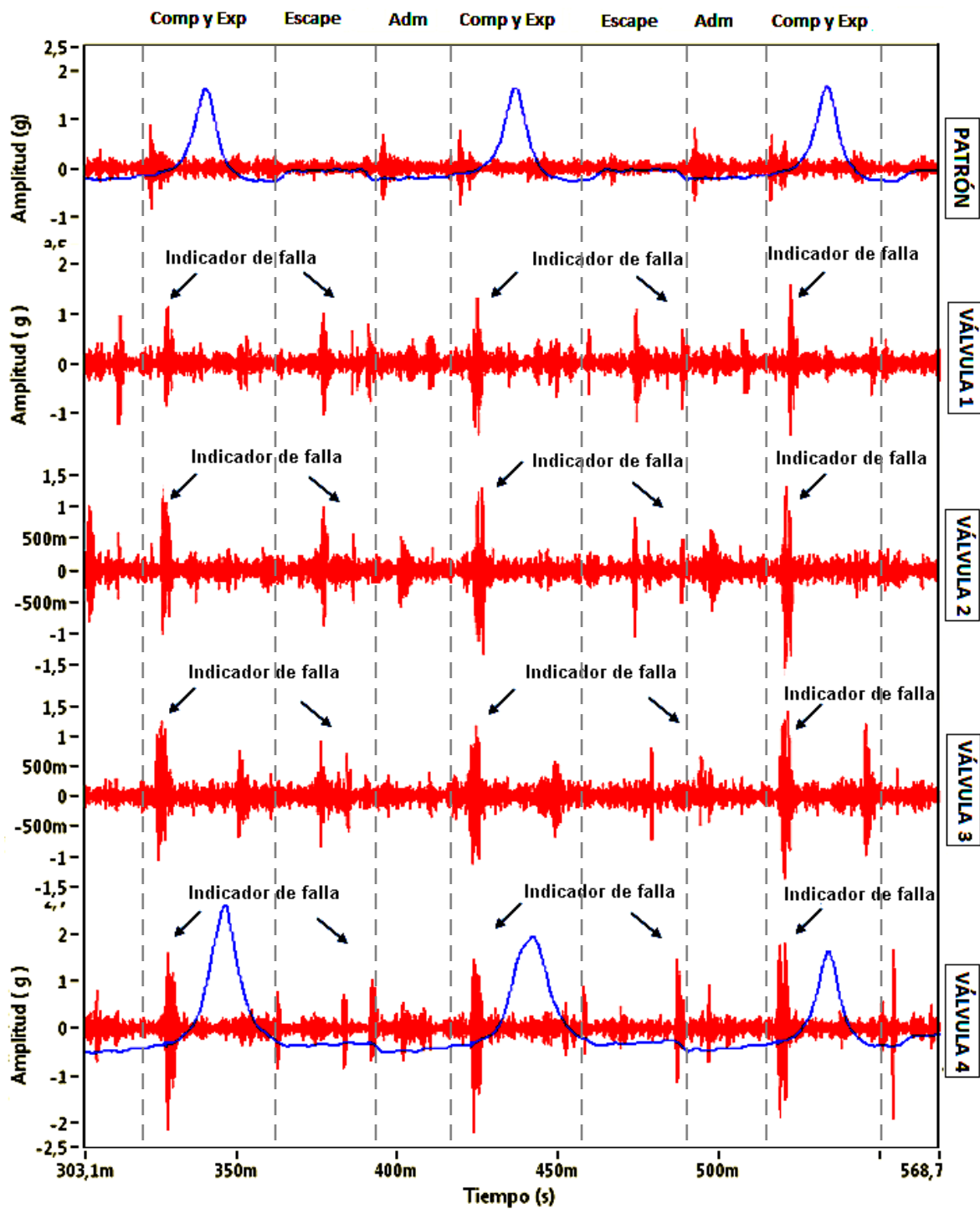
Figura 65. Inducción de la falla descalibración de válvula 2 de admisión.



Fuente. Los autores.

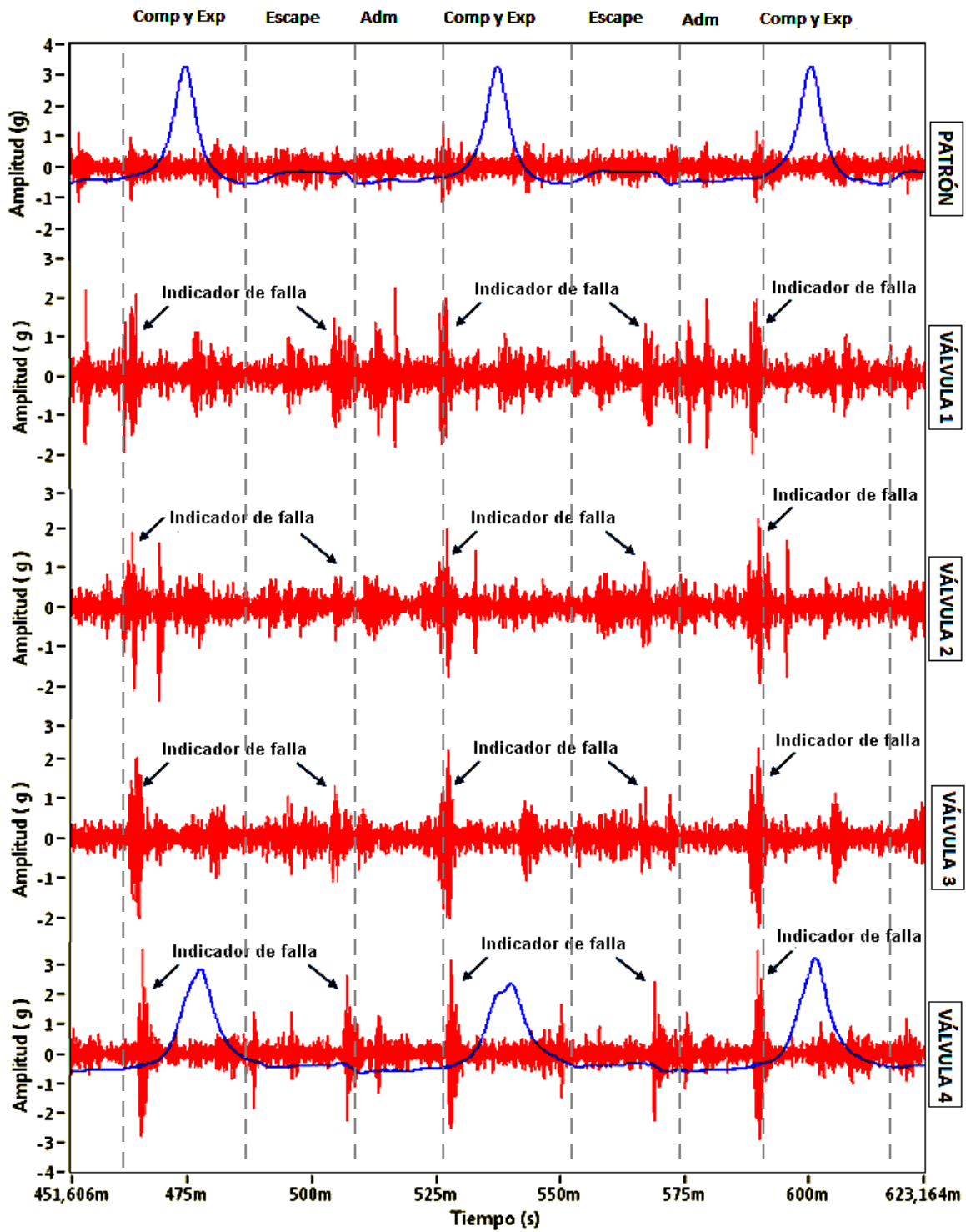
11.2.2. Señales adquiridas

Figura 66. V.V. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 1250 rpm.



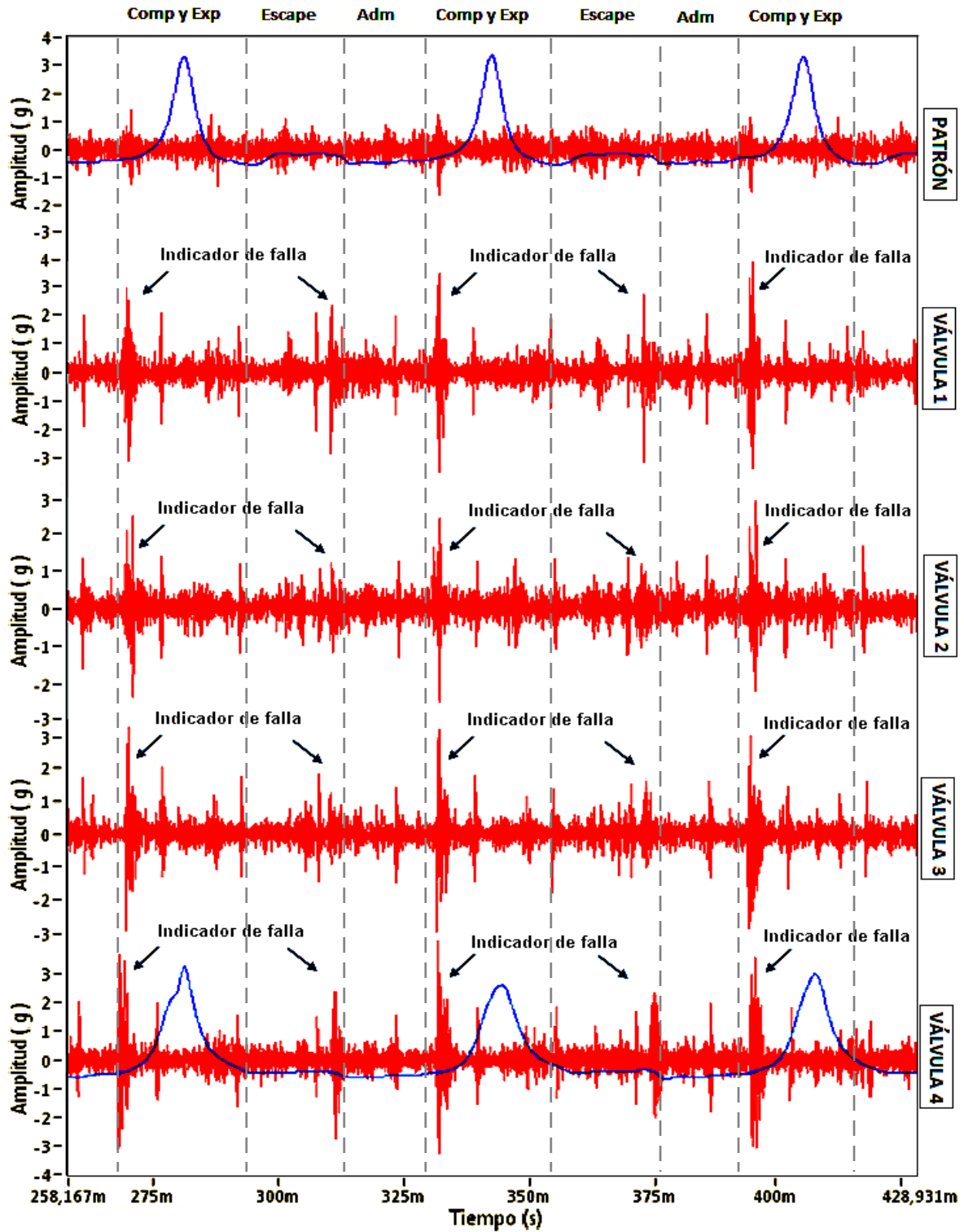
Fuente. Los autores.

Figura 68. V.V. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 2000 rpm.



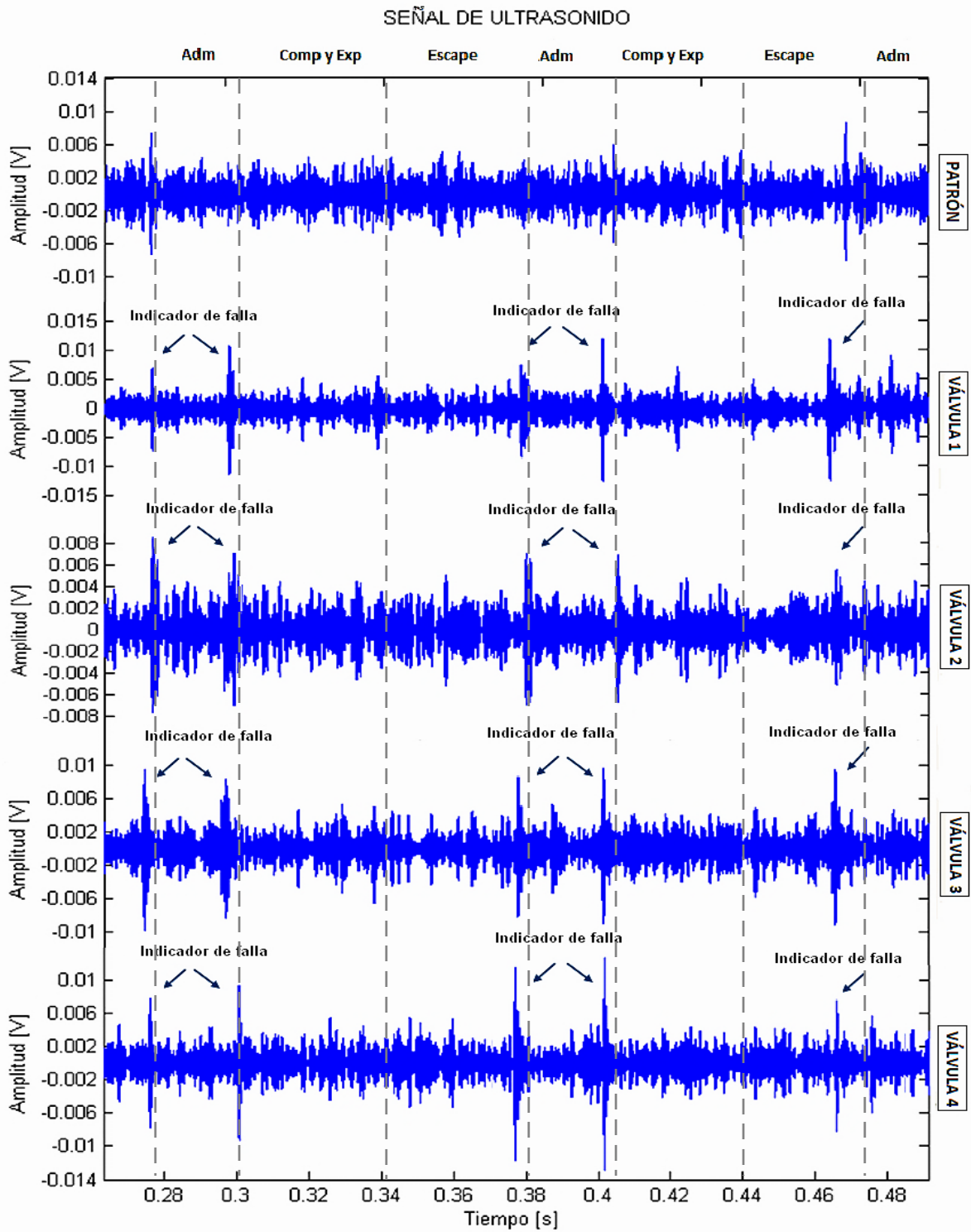
Fuente. Los autores.

Figura 69. V.H. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 2000 rpm.



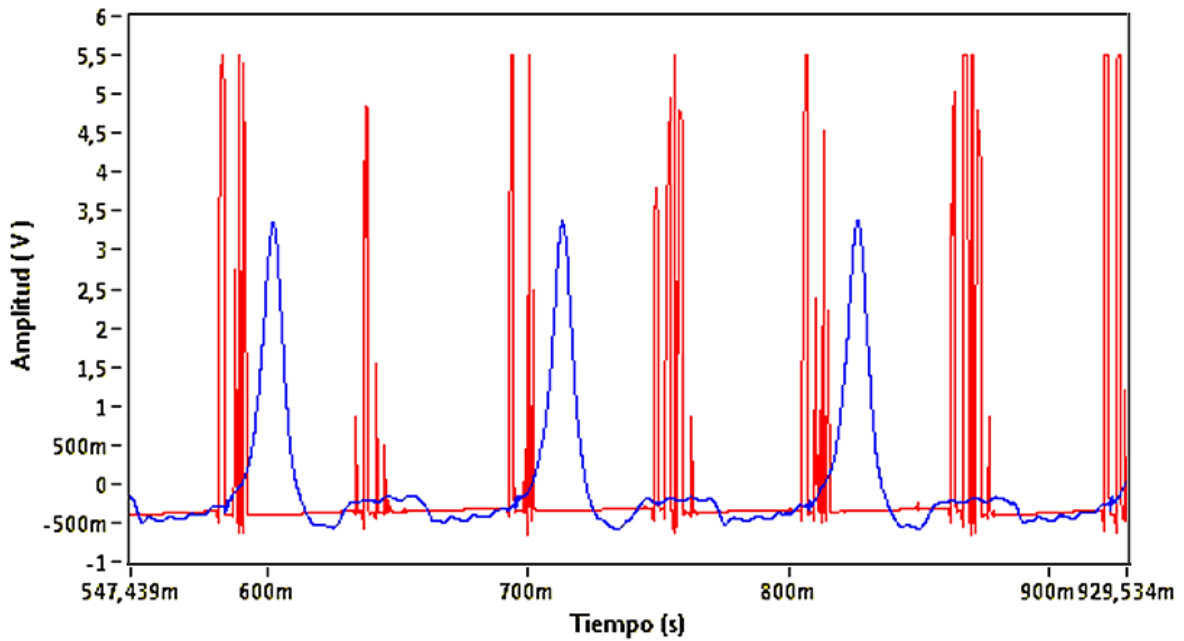
Fuente. Los autores.

Figura 70. S.U. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de admisión descalibrada a 1250 rpm.



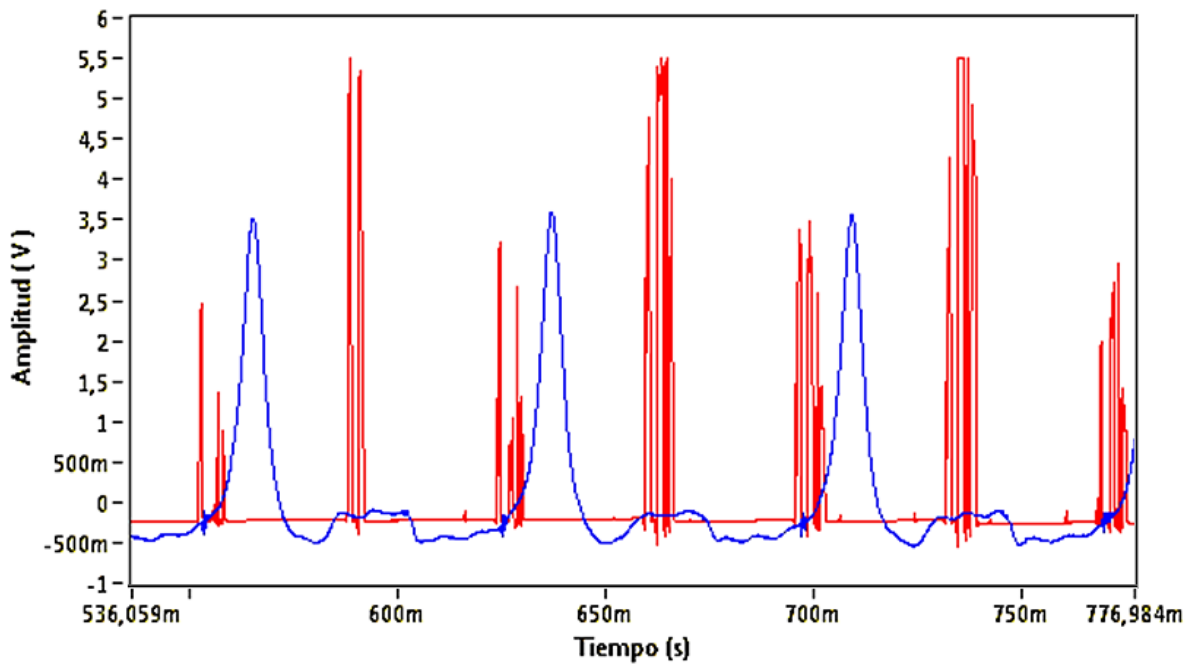
Fuente. Los autores.

Figura 71. S. Presión: Válvula 4 de admisión descalibrada a 1250 rpm.



Fuente. Los autores.

Figura 72. S. Presión: Válvula 4 de admisión descalibrada a 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

La tabla 7 muestra las temperaturas promedio en cada cilindro durante las pruebas de descalibración de las válvulas de admisión:

Tabla 9. Temperaturas: pruebas de descalibración de válvulas de admisión.

PRUEBA	TEMPERATURAS				
	T1	T2	T3	T4	Tprom
Descalibración válvula 2 admisión 1250 rpm	400	305	361	328	349
Descalibración válvula 2 y 4 admisión 1250 rpm	417	305	378	324	356
Descalibración válvula 4 admisión 1250 rpm	389	308	383	346	357
Descalibración válvula 2 admisión 2000 rpm	535	444	514	525	505
Descalibración válvula 2 y 4 admisión 2000 rpm	522	438	527	353	460
Descalibración válvula 4 admisión 2000 rpm	521	413	520	560	504

11.2.3 Análisis de resultados y caracterización de la falla

- La amplitud de la vibración del motor es directamente proporcional al régimen de velocidad de éste, es decir, al aumentar la velocidad de rotación del motor, aumenta la amplitud en la vibración de éste. Además, los niveles de vibración en la dirección vertical son mayores que los niveles de vibración en la dirección horizontal.
- Las señales de vibración tanto a 1250 como a 2000 rpm permiten observar claramente la aparición de dos picos de gran amplitud de vibración y grosor que no existen en los patrones de condición normal de funcionamiento, este fenómeno se observa en las gráficas de descalibración de cada una de las válvulas, tanto en dirección vertical como horizontal, y en teoría representarían el golpeteo que se presenta en la apertura y cierre de las válvulas cuando estas están descalibradas, ver las figuras 66 a 69, las cuales muestran la vibración mecánica del motor respecto al ciclo del cilindro correspondiente a la válvula descalibrada. En ellas se puede observar claramente la aparición de dichos picos de apertura y cierre de la válvula de admisión, señalados con la

flecha de indicador de falla, y su permanencia en la misma ubicación con respecto al ciclo correspondiente.

- La principal característica de los picos relacionados con la apertura y cierre de válvulas es el gran grosor de la zona de picos donde éste se presenta, la cual por lo general, está encabezada por un pico máximo, a partir del cual, le siguen otros picos a lo largo del tiempo de cada vez menor amplitud, formando una especie de triángulo, en algunos casos el primer pico o pico de apertura de la válvula es el mayor, pero por lo general, el pico del cierre de la válvula es el de mayor amplitud.
- La ubicación de los dos picos característicos de ésta falla coincide casi perfectamente con el lugar en el que teóricamente deberían aparecer, en los puntos de apertura y cierre de la válvula de admisión, ya que como se puede observar claramente en las figuras 66 a 69, uno de los pico aparece justo después del periodo de escape del motor, correspondiente a la apertura de la válvula de admisión, y el otro antes de comenzar el domo de compresión de la mezcla, punto en el que ocurre el cierre de dicha válvula. Además, se puede observar claramente la permanencia de dicho fenómeno ya que se cumple para cada una de las válvulas descalibradas, observándose un alineamiento de dichos picos característicos de la falla en la etapa de admisión del ciclo del cilindro correspondiente.
- Esta falla también se puede detectar fácilmente a través de la señal de ultrasonido, en la cual, se puede observar claramente la aparición de los mismos dos picos característicos de la falla en prácticamente la misma ubicación detectada a través de las señales de vibración tanto en dirección vertical como horizontal, como muestra la figura 70 correspondientes a las señales de ultrasonido para cada una de las válvulas descalibradas. La señal de ultrasonido serviría para corroborar que existe un problema de

descalibración de válvulas, sin embargo es más fácil de detectar dicho problema a través de las señales de vibración mecánica, principalmente las de vibración en la dirección vertical.

- Como se puede observar en las figuras 71 y 72, la señal de presión también puede ser utilizada para la fácil detección de esta falla, ya que esta muestra un patrón particular, muy diferente al de la condición normal de funcionamiento. En las figuras mostradas se alcanza a detectar una perturbación en la señal de presión justo antes de iniciar el aumento de presión, lo cual corresponde en teoría a un cierre violento de la válvula de admisión. En teoría, se deberían ver dos perturbaciones en la señal de presión, una en la apertura y la otra en el cierre de la válvula, sin embargo, debido a que las pruebas se realizaron con una mínima descalibración de las válvulas, casi no se alcanza a ver la perturbación de la apertura, pero a medida que aumenta la severidad de la falla esta señal de falla se hace más notoria, como se puede ver en las figuras 98.
- Haciendo una comparación entre las tablas 2,3 y 9, la temperatura promedio de trabajo del motor no muestra variaciones significativas con respecto a las temperaturas promedio del buen estado de funcionamiento, en el caso de las pruebas realizadas en régimen de velocidad de 1250 rpm se obtuvo una caída de temperatura de alrededor de 20 °C con respecto a la temperatura obtenida en buen funcionamiento, sin embargo, para las pruebas a 2000 rpm se presentó en cambio un aumento en la temperatura promedio de operación del motor en dos de las pruebas realizadas y una leve disminución de temperatura en la tercera de estas, con respecto a la temperatura promedio de buen funcionamiento a ese régimen de velocidad. Por lo tanto, no se puede establecer ninguna tendencia en cuanto al comportamiento de la temperatura debida a la inducción de esta falla. Lo cual indica que aunque la válvula de admisión se encuentre descalibrada, el proceso de combustión se sigue

llevando regularmente alcanzando casi los mismos niveles de temperatura que en la condición normal.

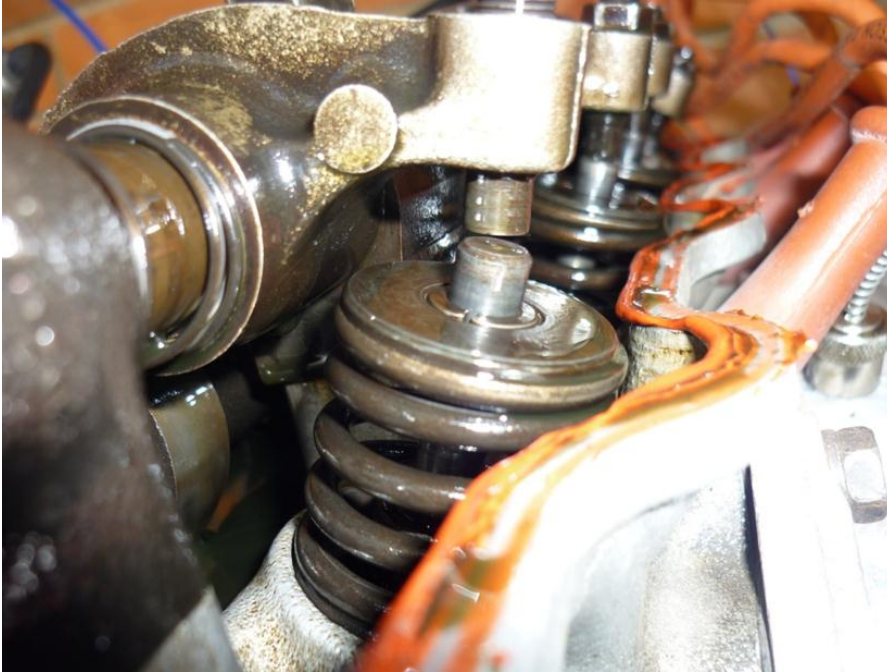
11.2.4. Inducción de la falla por descalibración de válvulas de escape

El método que se utilizó para producir esta falla fue mediante la manipulación de los tornillos reguladores de las válvulas. Al aflojar estos tornillos, se genera un retraso en el accionamiento mecánico de la válvula, ya que la leva tarda más tiempo en alcanzar el mecanismo.

En el estado de buen funcionamiento se realizó la calibración de todas las válvulas utilizando el instrumento de calibración de éstas (una galga calibrada), con lo cual se especificó la holgura adecuada de aproximadamente 0,5 mm para el motor empleado. Para inducir la falla en la válvula, se incrementó la holgura de ésta a un total de aproximadamente 2 mm con lo cual, aún no se percibía un cambio significativo en el comportamiento del motor a simple vista, pero, que sí pudiera ser detectada la falla mediante las técnicas de vibraciones y ultrasonido.

Las pruebas se realizaron para cada una de las válvulas de escape en los dos regímenes de velocidad estudiados, 1250 y 2000 rpm.

Figura 73. Inducción de falla descalibración de una válvula de escape.



Fuente. Los autores.

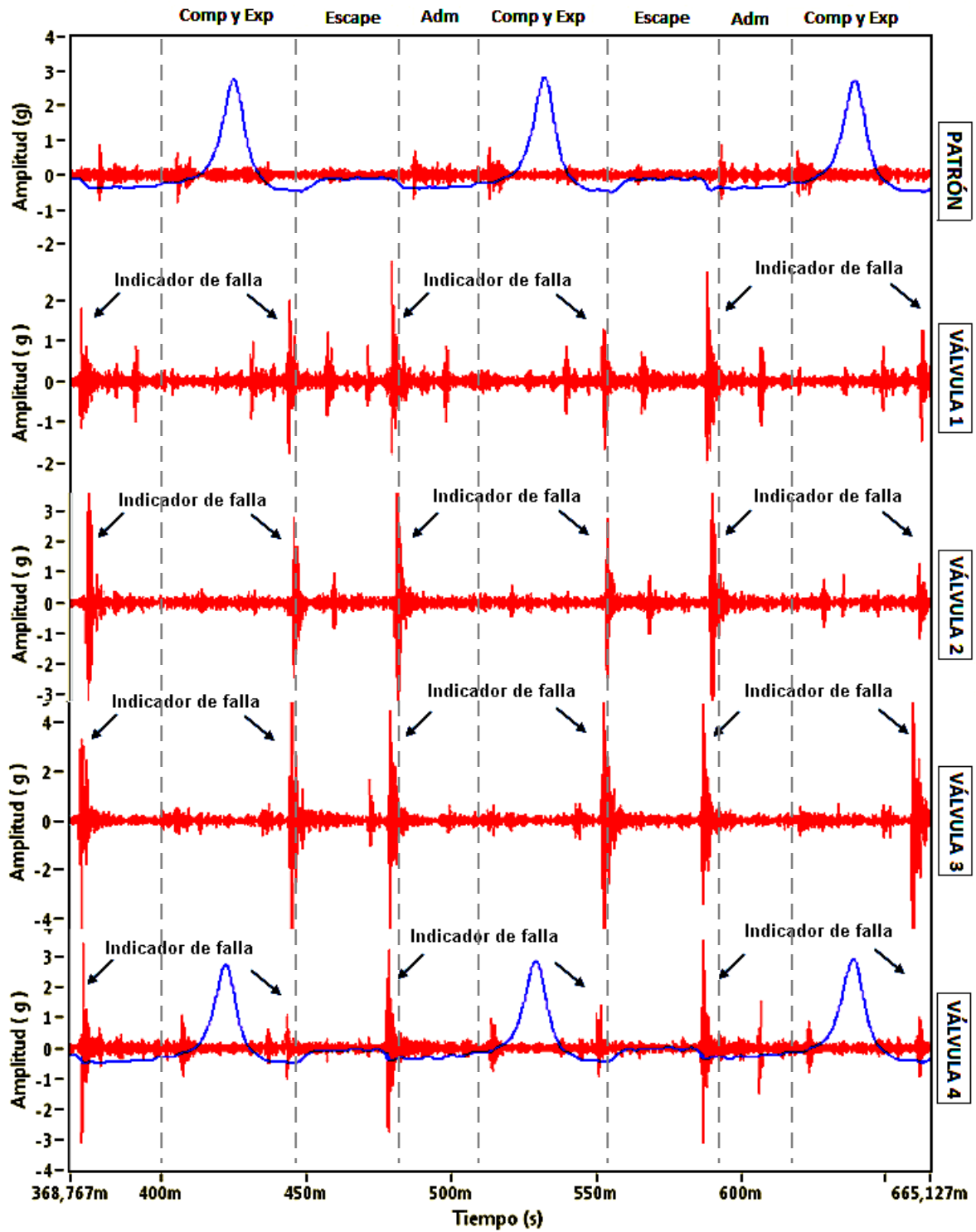
Figura 74. Inducción de falla descalibración de una válvula de escape.



Fuente. Los autores.

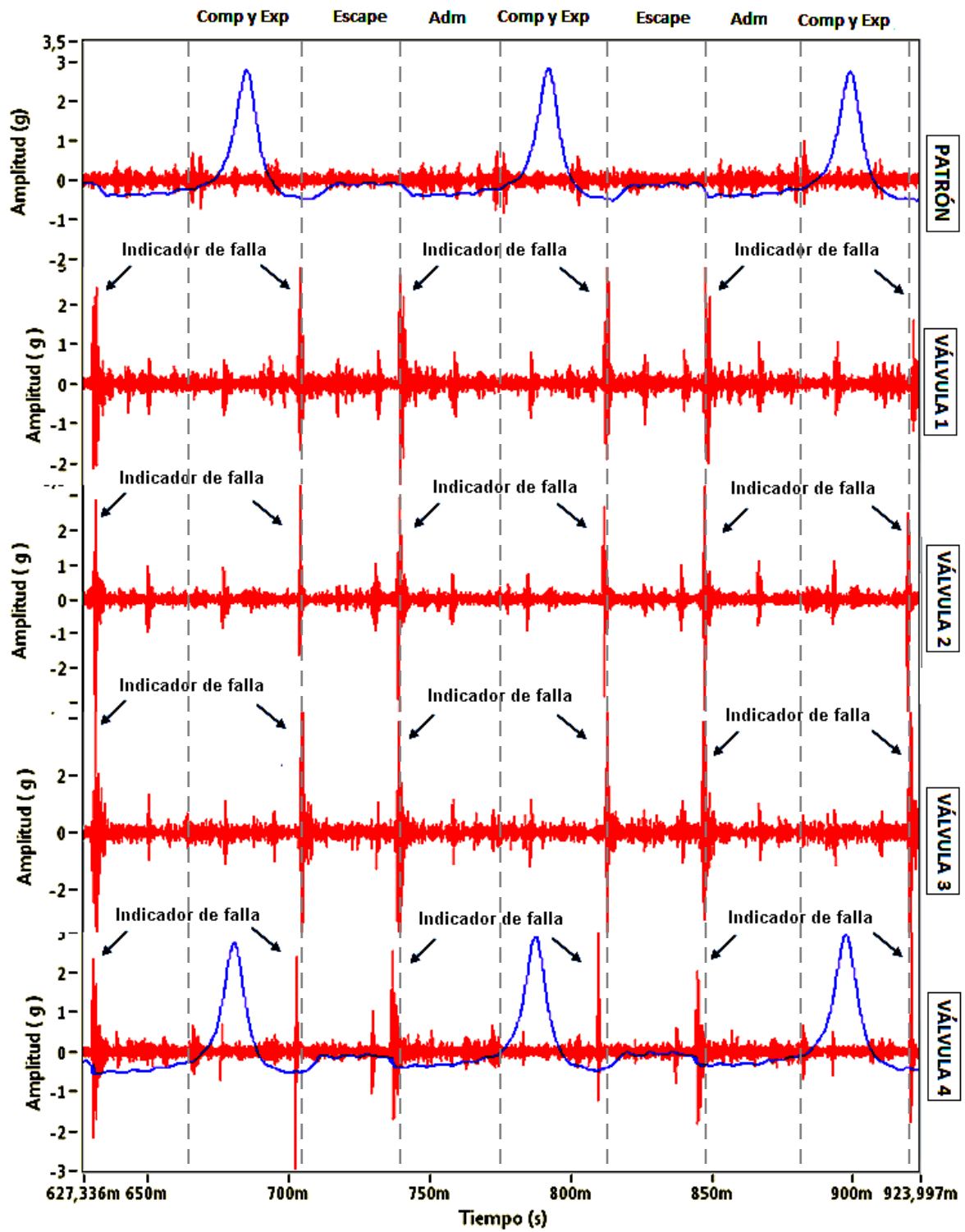
11.2.5. Señales adquiridas

Figura 75. V.V. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 1250 rpm.



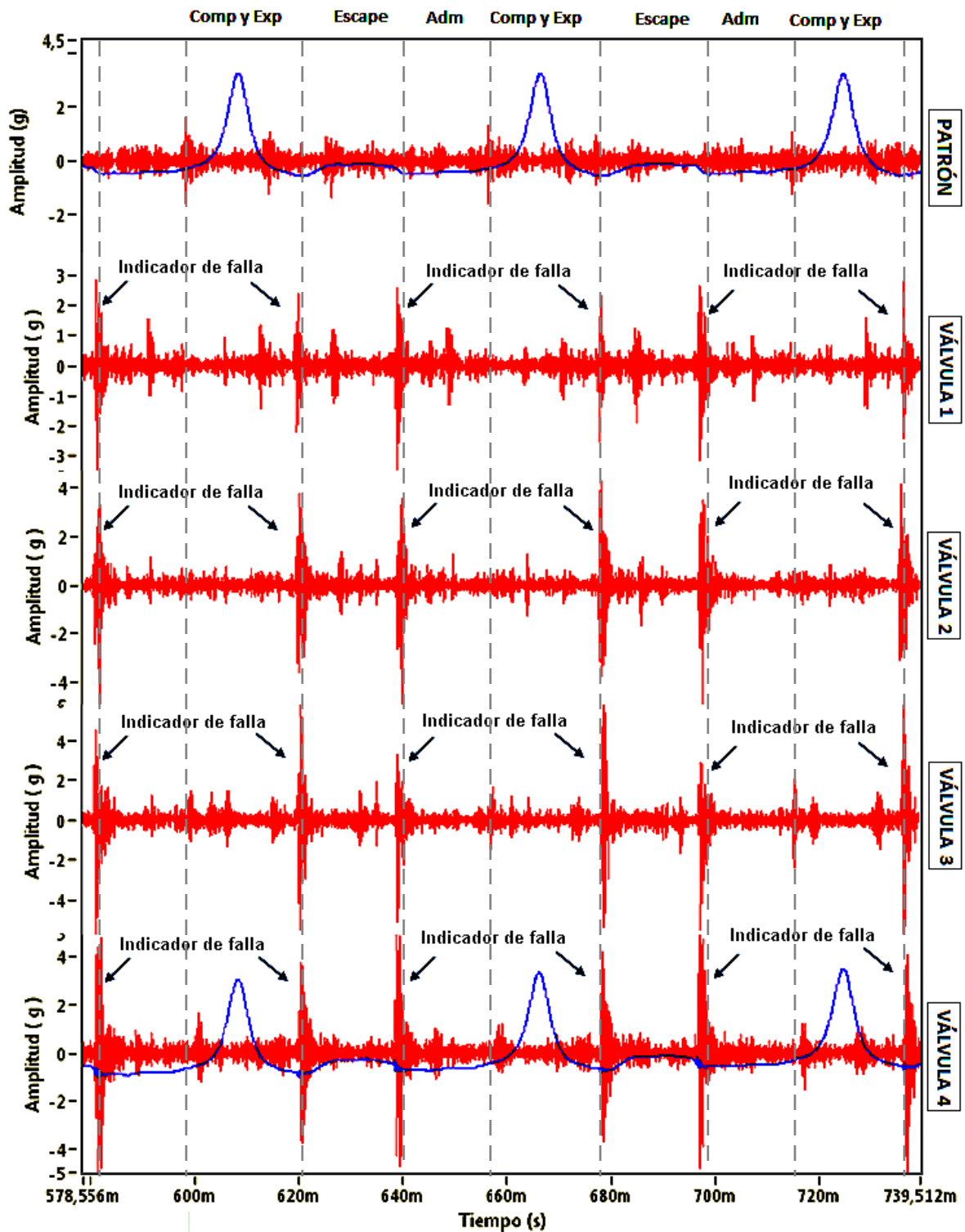
Fuente. Los autores.

Figura 76. V.H. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 1250 rpm.



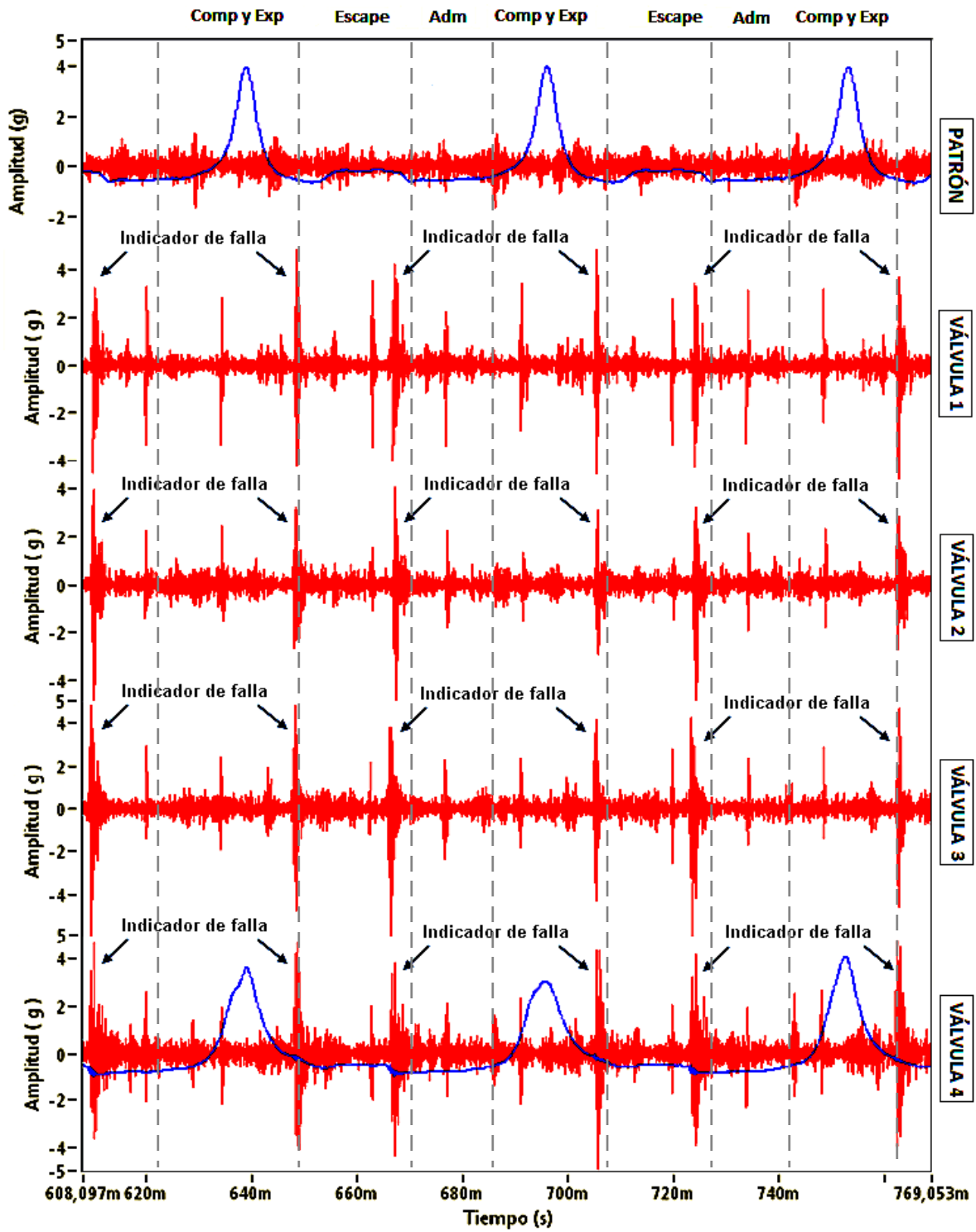
Fuente. Los autores.

Figura 77. V.V. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 2000 rpm.



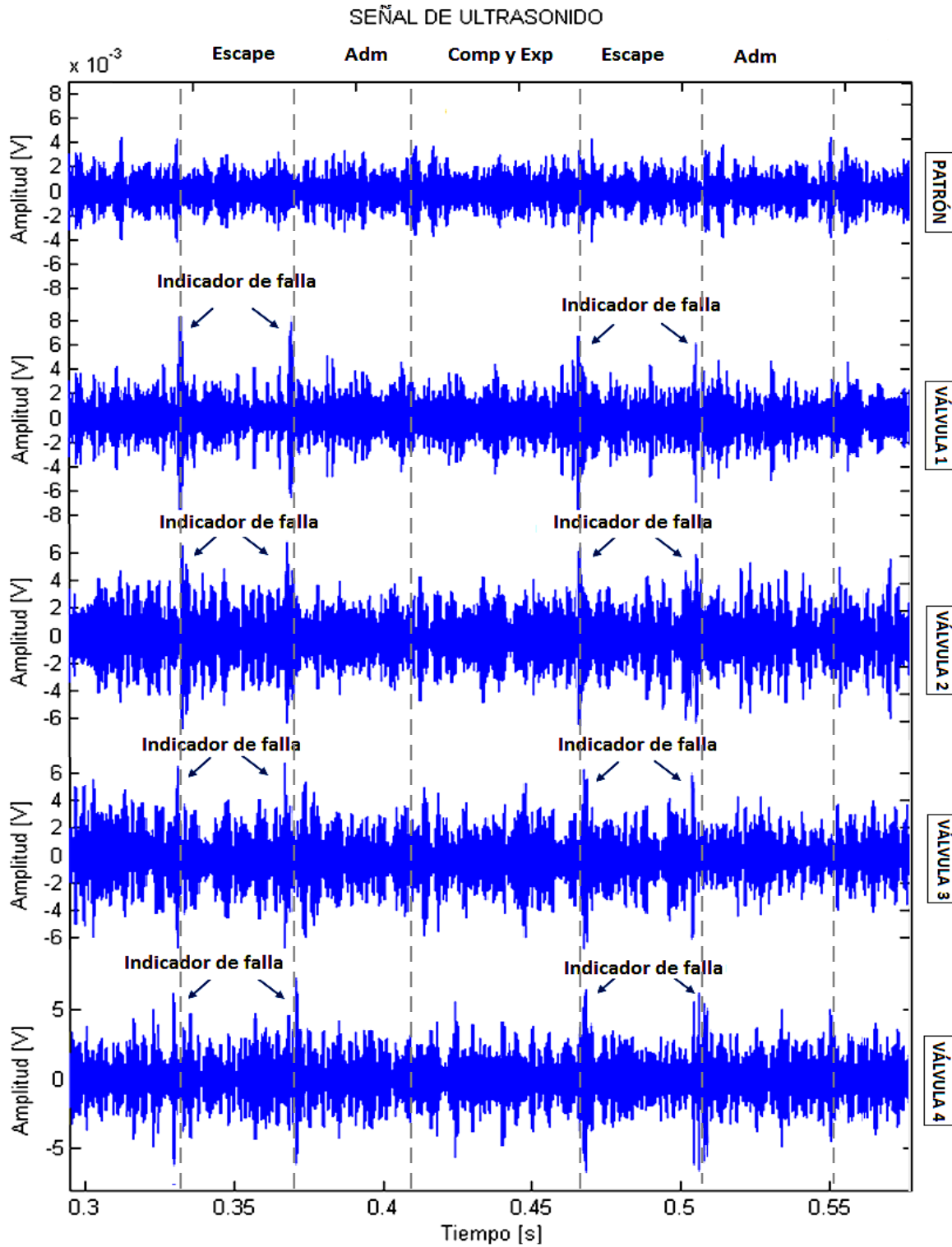
Fuente. Los autores.

Figura 78. V.H. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de escape descalibradas a 2000 rpm.



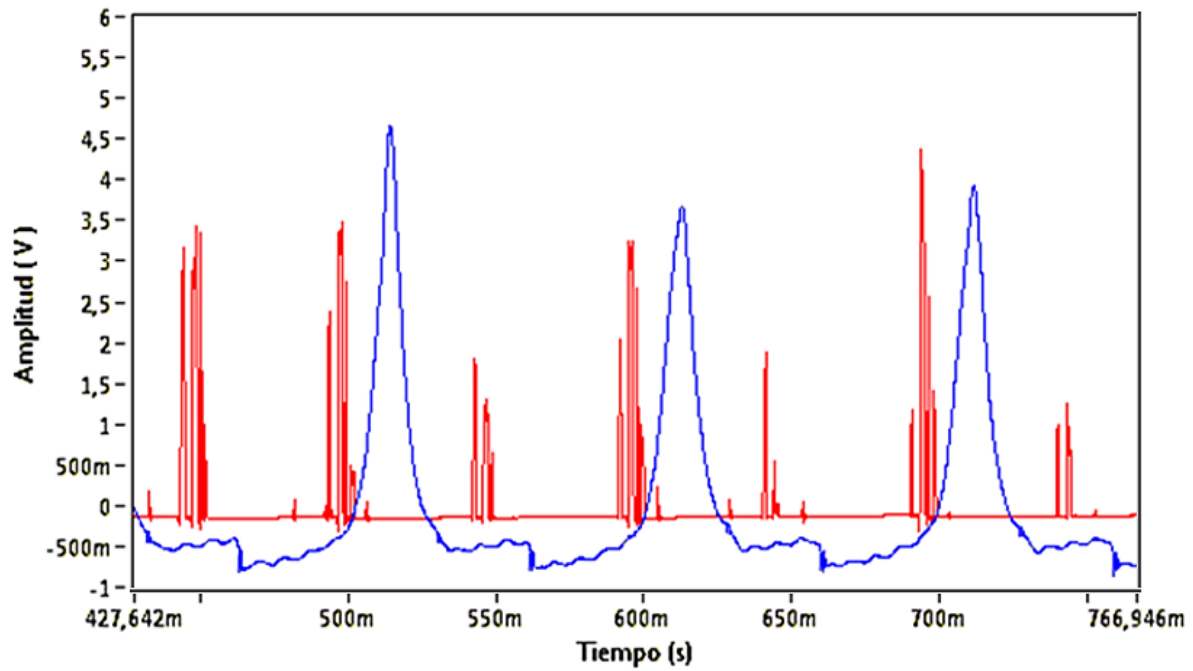
Fuente. Los autores.

Figura 79. S.U. Válvulas 1, 2, 3 y 4 de escape descalibrada a 1250 rpm.



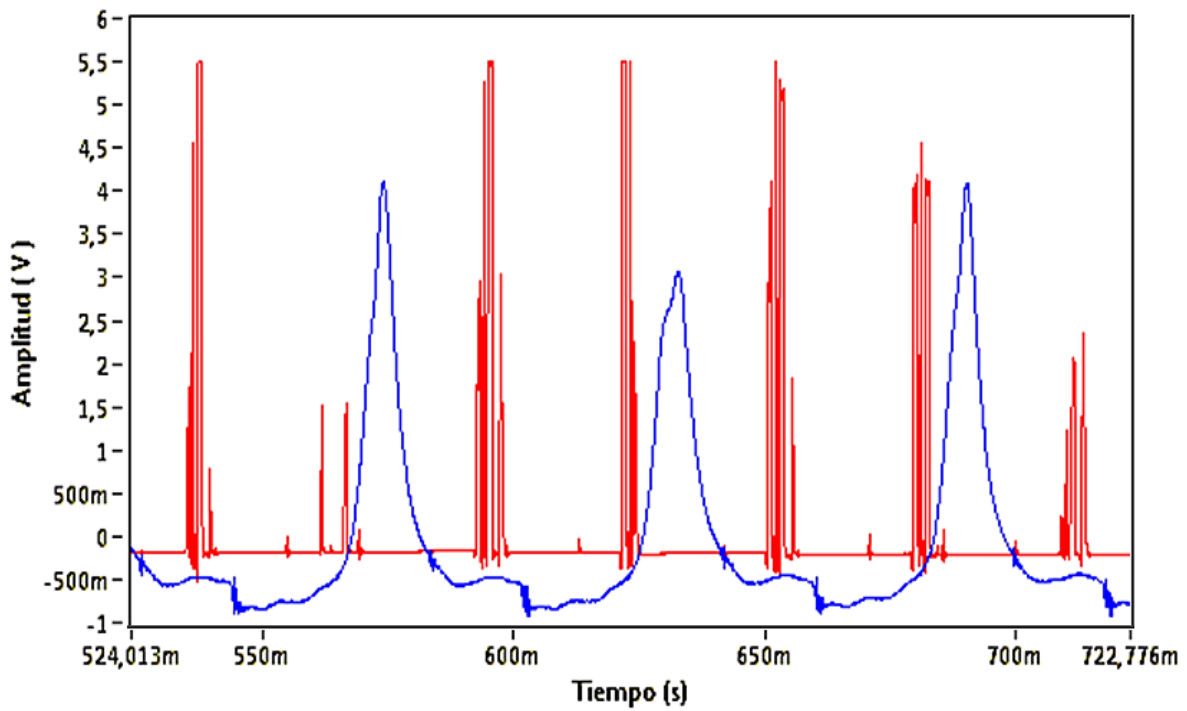
Fuente. Los autores.

Figura 80. S. Presión: Válvula 4 de escape descalibrada a 1250 rpm.



Fuente. Los autores.

Figura 81. S. Presión. Válvula 4 de escape descalibrada a 2000 rpm.



Fuente. Los autores.

La tabla 10 muestra las temperaturas promedio en cada uno de los cilindros durante las pruebas de descalibración de las válvulas de escape:

Tabla 10. Temperaturas: pruebas de descalibración de válvulas de escape.

PRUEBA	TEMPERATURAS				
	T1	T2	T3	T4	Tprom
Descalibración válvula 1 escape 1250 rpm	411	306	440	441	400
Descalibración válvula 1 y 3 escape 1250 rpm	310	292	363	407	343
Descalibración válvula 3 escape 1250 rpm	505	301	354	350	378
Descalibración válvula 3 y 4 escape 1250 rpm	437	286	146	305	294
Descalibración válvula 1 escape 2000 rpm	498	422	481	137	385
Descalibración válvula 1 y 3 escape 2000 rpm	490	350	187	433	365
Descalibración válvula 3 escape 2000 rpm	535	408	488	434	466
Descalibración válvula 3 y 4 escape 2000 rpm	490	351	188	434	366

11.2.6 Análisis de resultados y caracterización de la falla

- La amplitud de la vibración del motor es directamente proporcional al régimen de velocidad de éste, es decir, al aumentar la velocidad de rotación del motor, aumenta la amplitud en la vibración de éste. Además, los niveles de vibración en la dirección vertical son mayores que los niveles de vibración en la dirección horizontal.
- Las señales de vibración tanto a 1250 como a 2000 rpm permiten observar claramente la aparición de dos picos de gran amplitud de vibración y grosor que no existen en los patrones de condición normal de funcionamiento, este fenómeno se observa en las gráficas de descalibración de cada una de las válvulas, tanto en dirección vertical como horizontal, y en teoría representarían el golpeteo que se presenta en la apertura y cierre de las válvulas cuando estas están descalibradas, ver las figuras 75 a 78, las cuales muestran la vibración mecánica del motor respecto al ciclo del cilindro correspondiente a la válvula descalibrada. En ellas se puede observar claramente la aparición de

dichos picos de apertura y cierre de la válvula de escape, señalados con la flecha de indicador de falla, y su permanencia en la misma ubicación con respecto al ciclo correspondiente.

- La principal característica de los picos relacionados con la apertura y cierre de válvulas al igual que en las válvulas de admisión, es el gran grosor de la zona de picos donde éste se presenta, la cual por lo general, está encabezada por un pico máximo, a partir del cual, le siguen otros picos de cada vez menor amplitud durante un buen trayecto, formando una especie de triángulo. Además, se observa que en la totalidad de las gráficas de válvulas de escape descalibradas, el pico relacionado con el cierre de la válvula es de mayor amplitud que el relacionado con la apertura de la misma, ver las figuras de válvulas de escape descalibradas.
- La ubicación de los dos picos característicos de ésta falla coincide casi perfectamente con el lugar en el que en teoría deberían aparecer, en los puntos de apertura y cierre de la válvula de escape, ya que como se puede observar claramente en las figuras 75 a 78 uno de los pico aparece justo después del domo correspondiente a la combustión de la mezcla, una vez los gases han realizado su trabajo y caído la presión, instante en el cual ocurre la apertura de la válvula de escape para dejarlos salir; y el otro justo antes de iniciar la etapa de admisión del siguiente ciclo, punto en el que ocurre el cierre de dicha válvula. Además, se puede observar claramente la permanencia de dicho fenómeno ya que se cumple para cada una de las válvulas descalibradas, observándose un alineamiento de dichos picos característicos de la falla en la etapa de escape del ciclo del cilindro correspondiente.
- Esta falla también se puede detectar fácilmente a través de la señal de ultrasonido, en la cual, se puede observar claramente la aparición de los mismos dos picos característicos de la falla en prácticamente la misma

ubicación detectada a través de las señales de vibración tanto en dirección vertical como horizontal, como muestra la figura 79, correspondiente a las señales de ultrasonido para cada una de las cuatro válvulas de escape descalibradas. La señal de ultrasonido serviría para corroborar que existe un problema de descalibración de las válvulas de escape, sin embargo, es más fácil de detectar dicho problema a través de las señales de vibración mecánica, principalmente las de vibración en la dirección vertical, que muestran los picos más claramente.

- Como se puede observar en las figuras 80 y 81, la señal de presión también puede ser utilizada para la fácil detección de esta falla, ya que esta muestra un patrón particular, muy diferente al de la condición normal de funcionamiento. En las figuras mostradas se puede observar claramente la aparición de dos perturbaciones en la señal de presión: la primera se encuentra ubicada justo antes de terminar la caída de presión después del domo, en la zona donde se inicia la etapa de descarga, lo cual indica una apertura violenta de la válvula; y la segunda, al final de la zona de descarga que puede significar el cierre violento de la válvula de escape, las dos perturbaciones se pueden observar claramente.
- Haciendo una comparación entre las tablas 2, 3 y 10, por lo general se observó un comportamiento de una pequeña reducción en la temperatura promedio de salida de los gases de combustión en los dos regímenes de velocidad 1250 y 200 rpm, con respecto a las temperaturas promedio de buen funcionamiento correspondientes. Más particularmente, también se observó una leve y a veces considerable caída de temperatura en cada uno de los cilindros, en cuyas válvulas se había influenciado esta falla, descalibración en la válvula de escape. Este fenómeno puede ser lógico, ya que como se mencionó anteriormente en la caracterización de la señal de presión, la indicación de esta falla trae como consecuencia una gran distorsión de la señal de presión,

provocando adelgazamiento, quizás por fugas de gases en el caso de que no se esté dando el buen sello de la válvula, además de posibles problemas en la combustión de la mezcla que en general traerían reducción de la temperatura de los gases de escape.

12. CONCLUSIONES

- Se indujeron de forma progresiva para diferentes grados de severidad y dos regímenes de velocidad del motor, 1250 y 2000 rpm, las fallas correspondientes a mal funcionamiento de las bujías, obstrucción en las líneas de succión y de descarga, adelanto en el encendido de la mezcla y descalibración de válvulas de admisión y de escape, de un motor de combustión interna de cuatro cilindros marca Mazda 323 de 49 Kw.
- Se realizó de forma exitosa la caracterización de cada una de las fallas inducidas, mediante el análisis de las señales de vibración mecánica del motor tanto en la dirección vertical como horizontal, así como también mediante el análisis de señales de ultrasonido, de la presión del cuarto cilindro del motor y de los datos de temperatura de los gases de escape de cada uno de los cilindros, detallando las variaciones de cada una de éstas señales con respecto a los patrones de buen funcionamiento.
- La señal de presión fue muy valiosa a la hora de realizar el estudio de las señales captadas durante las pruebas de falla realizadas, ya que aunque solamente se contó con la señal de presión del cuarto cilindro, esta sirvió adecuadamente como guía para establecer la duración de un ciclo de trabajo del motor y además, tener una referencia de la posición angular permitiendo una fácil comprensión lógica de los fenómenos sucedidos. Por ejemplo, en el caso de falla por descalibración de válvulas de admisión y de escape permitió observar claramente para las válvulas del cuarto cilindro, la aparición de los picos de apertura y cierre de cada una de éstas en la posición lógica correspondiente según la curva de presión. Además de presentar variaciones significativas y contribuir en la caracterización de varias de las fallas estudiadas como en el caso de la falla por adelanto en el encendido de la mezcla y problemas por descalibración de válvulas.

- Las señales de vibración mecánica y ultrasonido, junto con la señal de presión fueron las más útiles a la hora de realizar la caracterización de las distintas fallas, ya que estas mostraron cambios significativos en su forma, mediante la aparición de picos y otras perturbaciones permanentes, no presentes en los patrones de referencia de la condición normal de funcionamiento.
- Los datos de temperatura de los gases de escape del motor no fueron muy útiles para realizar la caracterización de las fallas analizadas, ya que por lo general no mostraron cambios significativos respecto a los patrones de buen funcionamiento; presentándose una única excepción con las pruebas de bujías en las que sí se pudo caracterizar por temperatura.
- La falla por mal funcionamiento de las bujías es la más fácil de detectar, ya que ésta genera grandes perturbaciones tanto en las señales de vibración mecánica como en las señales de ultrasonido, pudiendo ser ésta fácilmente detectada a través de cualquiera de estas dos técnicas.
- No se pudo realizar una correcta caracterización de la falla por obstrucción en la línea de succión, ya que ni por vibraciones mecánicas, ni por ultrasonido se detectó una variación significativa con respecto a los patrones de buen funcionamiento, prácticamente no hubo variación alguna. Esto quizás debido a que se pretendía detectar turbulencias en el aire o en los gases de combustión, las cuales, en caso de presentarse probablemente generaban una perturbación de muy baja amplitud de vibración y sonido, que probablemente fue opacada y ocultada por la gran cantidad de ruido y vibración que generaba el motor durante su funcionamiento.

13. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis de máquinas reciprocantes, en general, muestra señales de vibración muy complejas y variables en función del tiempo debido a múltiples factores, por lo cual se recomienda para su estudio realizar varias tomas de datos y analizar cada uno de ellos en función del tiempo para seleccionar la condición más estable y característica de la señal, verificar la aparición del mismo patrón de vibración en las demás tomas de datos, para así de esta manera, poder contar con una señal representativa de la situación analizada y obtener buenos resultados tanto en la caracterización como en la posterior detección de la falla.
- Para el análisis de señales en máquinas reciprocantes es indispensable realizar un adecuado procesamiento y acondicionamiento de dichas señales, siempre se recomienda utilizar un filtro de bajas frecuencias (highpass) en el caso de señales de vibración mecánica, y un filtro de bajas y altas frecuencias (bandpass) en el caso de señales de ultrasonido. Esto es fundamental, ya que normalmente los indicios de falla en éstas máquinas se encuentran alojados en las vibraciones de alta frecuencias, las cuales son ocultadas tras los armónicos de baja frecuencia y de mayor amplitud de vibración.
- La caracterización de fallas en motores de combustión interna por medio de datos de temperatura puede ser no muy confiable, ya que sus datos varían mucho y pueden ser perturbados fácilmente por múltiples factores como una leve variación en el régimen de velocidad del motor, entrada en funcionamiento del ventilador del motor, fallas en los sensores debido a las extremas temperaturas que se pueden alcanzar, el tiempo de funcionamiento del motor antes y durante la prueba, entre otros factores que pueden influir errores y desconfianza en los datos adquiridos.

- La señal de presión característica del motor de combustión interna estudiado mostraba algunas irregularidades en la amplitud de los picos de máxima presión, se observaban picos de amplitud constante seguidos de algunos picos de mayor amplitud, por los que se recomienda tomar varias mediciones y analizar la señal en régimen constante, tal como se analizó en este proyecto.
- El buen procedimiento a la hora de la inducción de las fallas y el adecuado diseño de la ejecución y toma de datos en las pruebas, teniendo presente los efectos de generar la falla, la facilidad para repararla y los requerimientos para la ejecución de las pruebas, fueron condiciones fundamentales para lograr los resultados obtenidos.
- La percepción y el aislamiento de patrones de falla en señales de máquinas reciprocantes, donde las señales son complejas y muy variables, presenta un alto grado de dificultad, sin embargo, los resultados obtenidos en este proyecto exhiben un alto nivel de calidad.
- Los estudios realizados en este proyecto se llevaron a cabo en un motor de combustión bastante viejo, proveniente de un vehículo jubilado, por lo es posible que internamente tuviese varias fallas intrínsecas que hacen más difícil realizar la caracterización, por lo que se sugiere realizar los estudios de falla en otros motores preferiblemente nuevos para verificar la caracterización realizada.

BIBLIOGRAFÍA

- **CALDERÓN VARELA, Stephane Gianina.** Metodología para la evaluación de la combustión y compresión de motores diesel mediante las oscilaciones del bloque. Proyecto de grado para obtener título de Ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2005. p. 44-44.
- **GARCÍA CASTRO, Alfonso.** Vibraciones mecánicas. Módulo 1. Bucaramanga, UIS. 2001. p. 5-42
- **JAIMES BLANCO, Hernando Darío y SANTIS NAVARRO, Pablo José.** Diseño y construcción de un banco de pruebas de un motor de combustión interna a gasolina. Proyecto de grado para obtener título de Ingeniero mecánico. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, 2007. p. 38-44.
- **LONG, Bryan R y SCHUH, David N.** Fault detection and diagnosis in reciprocating machinery. Technical paper, p. 20. Disponible en internet URL: [http://www.betamachinery.com/uploadedFiles/004_-_Knowledge_Center/Technical_Articles/Fault%20Detection%20and%20Diagnosis%20\(1\).pdf](http://www.betamachinery.com/uploadedFiles/004_-_Knowledge_Center/Technical_Articles/Fault%20Detection%20and%20Diagnosis%20(1).pdf) .
- **MORENO, Fabián.** Documentación sobre el análisis de señales de deterioro y falla en motores y compresores reciprocantes mayores y estudio del software Windrock 6310 PA2.0. Bucaramanga, UIS. 2004 p. 53-85.
- **ROSSAS SARMIENTO, Guillermo.** Estudio de vibraciones mecánicas en máquinas reciprocantes. Proyecto de grado para obtener título de Ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. 2004. p. 2-301.

- **SEGRA COLOR.** Software NI LabView [online]. Disponible en internet URL:http://www.segracolor.com/cms/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=34&Itemid=45
- **SERRANO, Diego Orlando [Wood Group PSN], et. al.** Análisis recíprocante. En: Simposio internacional de vibraciones (1: 18-22, Octubre: Bucaramanga, Santander). Memorias. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, 2011, p. 1-60. Página oficial: www.woodgroup.com.co.