

**ADQUISICIÓN Y PRE-PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE VIBRACIÓN,  
ACÚSTICAS Y EMISIONES DE GASES EN UN MOTOR DIESEL  
MONOCILÍNDRICO**

**CAMILO GARCÍA JARAMILLO**

**1088313537**

**LUIS MIGUEL SÁNCHEZ RAMÍREZ**

**1094944849**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PEREIRA, RISARALDA**

**2018**

**ADQUISICIÓN Y PRE-PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE VIBRACIÓN,  
ACÚSTICAS Y EMISIONES DE GASES EN UN MOTOR DIESEL  
MONOCILÍNDRICO**

**CAMILO GARCÍA JARAMILLO**

**1088313537**

**LUIS MIGUEL SÁNCHEZ RAMÍREZ**

**1094944849**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE**

**INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR**

**ING. HECTOR FABIO QUINTERO R. M.Sc., Ph.D.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PEREIRA, RISARALDA**

**2018**

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
<b>1. PRÓLOGO .....</b>	<b>12</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.3. OBJETIVO GENERAL .....	14
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.5. PRESUPUESTO .....	14
<b>2. ESTABLECER EL PROTOCOLO PARA LA CORRECTA ADQUISICIÓN DE SEÑALES.....</b>	<b>15</b>
2.1. DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	15
<b>3. ADQUIRIR SEÑALES DE VIBRACIÓN, ACÚSTICAS Y DE EMISIÓN DE GASES .</b>	<b>19</b>
3.1. PREPARACIÓN DE LAS PRUEBAS .....	19
3.2. TOMA DE LAS MUESTRAS .....	21
<b>4. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES MEDIDAS .....</b>	<b>24</b>
4.1. CONFIRMACIÓN DE NIVELES DE CARGA.....	24
4.2. ANALISIS DE OPACIDAD.....	27
4.3. ANALISIS DE VIBRACIONES Y ACÚSTICA.....	30
<b>5. GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....</b>	<b>50</b>
5.1. ALMACENAMIENTO DE DATOS .....	50
CONCLUSIONES.....	51
APORTES.....	52
RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Características de los inyectores.....	17
<b>Tabla 2.</b> Descripción de los tratamientos.....	18
<b>Tabla 3.</b> Matriz experimental aleatoria.....	22
<b>Tabla 4.</b> Datos tomados con el opacímetro para la primera réplica.....	23
<b>Tabla 5.</b> Cálculo de potencia para inyector de 18 MPa. ....	25
<b>Tabla 6.</b> Valor $T_{\text{student}}$ seleccionado .....	26
<b>Tabla 7.</b> Valor de potencia por carga.....	27
<b>Tabla 8.</b> Valor de potencia por presión de inyección. ....	27
<b>Tabla 9.</b> Opacidad promedio según inyector. ....	29
<b>Tabla 10.</b> Opacidad promedio según carga. ....	30
<b>Tabla 11.</b> Etiquetas. ....	33
<b>Tabla 12.</b> Rangos de opacidad.....	46

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de conexiones.....	17
<b>Figura 2.</b> Diagrama instalación del opacímetro.....	17
<b>Figura 3.</b> (a) acelerómetro Y, (b) acelerómetro X, (c) acelerómetro Z.....	20
<b>Figura 4.</b> Montaje del micrófono.....	20
<b>Figura 5.</b> Velocidad de giro ajustada en sus tres niveles.....	21
<b>Figura 6.</b> Potencia vs velocidad con inyector de 18 MPa.....	26
<b>Figura 7.</b> Potencia vs velocidad con inyector de 20 MPa.....	26
<b>Figura 8.</b> Potencia vs velocidad con inyector de 22 MPa.....	27
<b>Figura 9.</b> Opacidad vs velocidad con inyector de 18 MPa.....	28
<b>Figura 10.</b> Opacidad vs velocidad con inyector de 20 MPa.....	28
<b>Figura 11.</b> Opacidad vs velocidad con inyector de 22 MPa.....	29
<b>Figura 12.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, X).....	36
<b>Figura 13.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, -X).....	37
<b>Figura 14.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, -Y).....	37
<b>Figura 15.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, Y).....	38
<b>Figura 16.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Y, X).....	39
<b>Figura 17.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Y, -X).....	39
<b>Figura 18.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, X).....	40
<b>Figura 19.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, -X).....	41
<b>Figura 20.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, Y).....	41
<b>Figura 21.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, -Y).....	42
<b>Figura 22.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Y, X).....	43
<b>Figura 23.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, X).....	43
<b>Figura 24.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, -X).....	44
<b>Figura 25.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, Y).....	45
<b>Figura 26.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, -Y).....	45
<b>Figura 27.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de opacidad. (Z, X).....	46
<b>Figura 28.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de opacidad. (Z, -X).....	47
<b>Figura 29.</b> PCA momentos estadísticos con etiqueta de opacidad. (Z, Y).....	49

**LISTA DE ECUACIONES**

Ecuación 1 .....	24
Ecuación 2 .....	31
Ecuación 3 .....	31
Ecuación 4 .....	31
Ecuación 5 .....	31
Ecuación 6 .....	31
Ecuación 7 .....	32
Ecuación 8 .....	32
Ecuación 9 .....	32
Ecuación 10 .....	32
Ecuación 11 .....	32
Ecuación 12 .....	32

**LISTA DE ANEXOS**

<b>ANEXO A:</b> Motor 186F. ....	55
<b>ANEXO B:</b> Opacímetro .....	57
<b>ANEXO C:</b> Especificaciones del sistema de carga .....	59
<b>ANEXO D:</b> Acelerómetros .....	64
<b>ANEXO E:</b> Señal acústica .....	65
<b>ANEXO F:</b> Régimen de giro .....	67
<b>ANEXO G:</b> Módulo de adquisición de datos .....	68
<b>ANEXO H:</b> Especificaciones inyectores .....	69

**LISTA DE SIMBOLOS**

<i>P</i>	Potencia [W]
<i>N</i>	Revoluciones por minuto [rpm]
<i>V</i>	Voltios [V]
<i>P<sub>i</sub></i>	Presión de inyección [MPa]
<i>R</i>	Relación de fuerzas
<i>M</i>	Torque [Nm]
<i>CA</i>	Corriente Alterna
<i>DC</i>	Corriente Directa
<i>D</i>	Diámetro [m]
<i>F</i>	Fuerza [N]
<i>CO<sub>2</sub></i>	Bióxido de Carbono
<i>L</i>	Longitud [m]

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado, en primer lugar, a mis padres, a quienes debo mi formación y agradezco su constancia y esfuerzo. En segundo lugar, a mi hermana y mi cuñado, a quienes agradezco profundamente por su apoyo incondicional, sus sabios consejos y su noble voluntad de hacer de mi un profesional exitoso. Finalmente, a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a la culminación de este proceso.

**Camilo García Jaramillo.**

Este proyecto es dedicado inicialmente a mis padres, los cuales me enseñaron desde el hogar a ser correcto y responsable, además de darme todo el apoyo necesario para llevar a cabo una formación como profesional. Adicionalmente, dedico este trabajo a mis hermanos los cuales fueron ejemplos a seguir durante toda mi vida para convertirme en la persona que soy. Por último, deseo dedicarle este proyecto a los colegas que me acompañaron durante este proceso universitario.

**Luis Miguel Sánchez Ramírez.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos especialmente a nuestras familias por su perseverante apoyo y acompañamiento durante todo este proceso. Al ingeniero Hector Fabio Quintero, director de este proyecto de grado, agradecemos su valioso acompañamiento y su siempre diligente voluntad. A los ingenieros Carlos Alberto Romero y Edison Henao, gracias por sus consejos y apoyo. Igualmente, estamos profundamente agradecidos con los ingenieros Juan Camilo Mejía, Daniela Torres y Juan David Ramírez, por sus valiosas contribuciones al proyecto de grado y su disposición para una constante retroalimentación.

Los autores agradecen a Colciencias, mediante el apoyo ofrecido al proyecto “Desarrollo de un sistema de monitoreo para el análisis energético y de condición de emisiones en motores de combustión interna diésel con base en técnicas no intrusivas”, código 57801, contrato No. FP44842-031-2018, mediante el programa 776-2017 CONFORMACIÓN DE UN BANCO DE PROYECTOS ELEGIBLES DE GENERACIÓN DE NUEVO CONOCIMIENTO – 2017.

Finalmente, agradecemos a la Facultad de Ingeniería Mecánica, a sus profesores y directivos por permitir el desarrollo de nuestro proceso de formación. A la Universidad Tecnológica de Pereira por brindarnos un espacio en el que fue posible crecer tanto académica como personalmente.

**RESUMEN**

En este trabajo se implementa un procedimiento de diagnóstico de un motor diésel mono cilíndrico, basado en el análisis de señales no intrusivas como: acústicas, vibraciones y opacidad. En este sentido, se evalúa una correlación entre estas y algunos factores característicos del funcionamiento del motor, que permitan arrojar una caracterización del estado en el que se encuentra el mismo. Con este fin se realizó un experimento en un banco de pruebas dispuesto en el Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica de Pereira, en dónde existe la posibilidad de registrar señales en tiempo real de variables características del motor y contrastarlas con las lecturas de las señales no intrusivas. Toda la información que sea recopilada será destinada a la generación de una base de datos que pueda ser utilizada en posteriores investigaciones. Además, se hace una revisión bibliográfica acerca del estado del arte de algunos de estos métodos para poder tomar consideraciones importantes que fueron necesarias en la elaboración del presente trabajo.

**Palabras clave:**

Acelerómetros, opacidad, opacímetro, presión de inyección, régimen de giro, carga, motor DIESEL, mono-cilindro, CHANGFA 186 F, análisis de componentes principales, CLUSTER, PCA.

**ABSTRACT**

In this work, a diagnostic procedure of a cylindrical mono diesel engine is implemented, based on the analysis of non-intrusive signals such as acoustics, vibrations and opacity. In this sense, a correlation is evaluated between these and some characteristic factors of the operation of the engine, which allow a characterization of the state in which it is found. To this end, an experiment was carried out in a test bench located in the Laboratory of Internal Combustion Machines of the Technological University of Pereira, where it is possible to record signals in real time of variable motor characteristics and contrast them with the readings of the non-intrusive signals. All the information that is collected will be destined to the generation of a database that can be used in further investigations. In addition, a literature review is made about the state of the art of some of these methods in order to take important considerations that were necessary in the elaboration of this work.

**Key words:**

Accelerometers, opacity, opacimeter, injection pressure, rotation rate, load, DIESEL engine, single-cylinder, CHANGFA 186 F, principal component analysis, CLUSTER, PCA.

## **CAPITULO I**

### **1. PRÓLOGO**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente trabajo se estudiará la relación que existe entre algunas variables de operación de los motores, y variables no intrusivas con el fin de generar una base de datos para la realización de software computacional que permita diagnosticar la operación de un motor mediante la adquisición de señales no intrusivas.

La población de interés son los motores de encendido por compresión que funcionan con combustible diésel, ya que estos motores son ampliamente utilizados tanto para el transporte como para la generación de energía ya que son más eficientes al momento de convertir combustible en energía útil que los motores a gasolina. Si bien los motores DIESEL consumen menos combustible, por lo que produce menos CO<sub>2</sub> y por otro lado resultan más económicos, el humo de la combustión de un vehículo diésel produce tantas partículas en suspensión como cuatro vehículos a gasolina, como consta en el estudio "Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado", que ha elaborado el Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera", del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en España [1]. Además, debido a la necesidad de incrementar la potencia de dichos motores, estos funcionan con mezclas altamente rica en oxígeno que no se mezcla en su totalidad, y que a altas presiones y temperaturas forma NOx que son altamente contaminantes.

Por esta razón, es importante ahondar en el estudio de los motores diésel, reduciendo y controlando el impacto negativo que generan en el medio ambiente. Aunado a esto, existe la necesidad también de aprovechar y continuar con el creciente desarrollo de técnicas de mantenimiento no intrusivas que permitan aportar información precisa del estado de operación de las máquinas sin la condición expresa de intervenirlas.

Con este propósito se diseña un experimento que involucra tres variables de operación de un motor diésel mono-cilindro: velocidad, presión de inyección y carga. Se registraron los valores aportados por tres acelerómetros y un micrófono, así como también las lecturas registradas por un opacímetro.

Para la evaluación de la correlación que existe entre las variables no intrusivas con las variables que fueron tomadas como factores en el diseño del experimento se aplicó una técnica denominada análisis de componentes principales que resulta útil si se quiere reducir

el número de variables a estudiar. Mediante la creación de combinaciones lineales de las variables reales que cumplan la condición de variabilidad máxima, es posible encontrar combinaciones que permitan entender la información contenida en los datos, ya que la forma en cómo se construyen las combinaciones lineales y su relación con unas u otras variables, contribuye al entendimiento de la correlación inherente entre los datos.

Finalmente, con el objetivo de presentar toda la información adquirida de una manera ordenada y de fácil acceso, este estudio incluirá una carpeta con todos los resultados dentro de una base de datos, adjuntando además en este documento, una guía que entregará de manera clara, toda la información que sea identificada.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los servicios de transporte y la infraestructura hacen parte fundamental del mercado mundial, así como del desarrollo social y económico [2]. Además, se debe mencionar que la infraestructura se constituye en un factor de producción, y la movilidad en un determinante del costo y del mercado [3], de esta manera se preside la importancia de los motores en el mercado actual. La norma ISO 13372 [4] define el mantenimiento predictivo como "el mantenimiento enfocado en la predicción de la falla y en la toma de decisiones basadas en la condición del equipo para prevenir su degradación o falla". En este sentido la adquisición de señales por medio de técnicas no intrusivas ha cobrado gran interés mundial gracias al desarrollo tecnológico y a la creciente utilización de sensores para el análisis del estado de los equipos en tiempo real. Mediante la utilización de esta técnica se buscará recolectar información pertinente sobre el funcionamiento de los motores diésel que sirva como sustento científico.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se puede concluir que los motores diésel hacen parte del mercado mundial, ya que se presentan en la infraestructura como producción estacionaria de energía en sistemas de agricultura, procesos de manufactura y empresas prestadoras de servicios; así también como son fundamentales en la movilidad de personas dentro y fuera de las ciudades. Sabiendo esto, es claro que la aplicación de técnicas de mantenimiento efectivas, que mantengan estas máquinas en un buen estado de operación son económicamente importante.

Sin embargo, es de gran interés el disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> que actualmente genera Colombia. En un reporte del IDEAM [5] se comparten las emisiones de gases dividida en

diferentes sectores, observando que debido a la quema de combustible existe un impacto importante. Las industrias manufactureras y el sector de transporte producen un 11% de las emisiones totales del país cada uno, del cual la quema de combustible representa un 16,7% en las industrias, y en el sector del transporte terrestre ocasiona un 25,6%. Es entonces el medir la opacidad un factor importante para que estos estudios sean llevados con el fin de disminuir la contaminación, ya que los motores diésel pueden llegar a representar casi 4,65% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia.

### 1.3. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y desarrollar un protocolo para la adquisición de señales en un motor de combustión interna diésel a partir de técnicas no intrusivas.

### 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Establecer el protocolo para la correcta adquisición de señales con base en las recomendaciones del maestro guía.
- II. Adquirir señales de vibración, acústicas y de emisión de gases con ayuda de instrumentos especializados.
- III. Procesar las señales adquiridas mediante técnicas tiempo frecuencia a fin de hacer más explícitos los valores de interés.
- IV. Generar una base de datos organizada y confiable que facilite el posterior análisis de los valores de interés que servirán como evidencia científica.

### 1.5. PRESUPUESTO

RUBRO	FINANCIADO POR	CONTRAPARTIDA EN EFECTIVO	CONTRAPARTIDA EN ESPECIE	VALOR TOTAL
Acelerómetros y tarjeta de adquisición	Laboratorio de Vibraciones	\$ 0	6'400.000	6'400.000
Micrófono		\$ 75.000	\$ 0	\$ 75.000
Inyectores e insumos	Laboratorio de máquinas de combustión interna	\$ 0	\$ 900.000	\$ 900.000
Motor diesel y dinamómetro		\$ 0	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
Opacímetro		\$ 0	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
Director de Tesis	Facultad de ingeniería mecánica	\$ 0	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
Estudiante 1		\$ 0	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
Estudiante 2		\$ 0	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 13.575.000</b>

## **CAPÍTULO II**

### **2. ESTABLECER EL PROTOCOLO PARA LA CORRECTA ADQUISICIÓN DE SEÑALES**

#### **2.1. DISEÑO DEL EXPERIMENTO**

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del resultado. Asimismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema [6]. Es necesario proporcionar validez estadística al presente proyecto, y así garantizar que lo desarrollado en este trabajo de grado sirva como base experimental para futuros desarrollos y profundizaciones en el tema, se requiere utilizar una metodología para el diseño experimental. Siendo que, como variables de interés para el estudio se tomarán la presión de inyección, velocidad de giro del motor y régimen de carga, es importante tener en cuenta las posibilidades y limitantes presentes en el banco de pruebas del que se dispone en el Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica de Pereira. Así pues, es preciso resaltar que no se cuenta con un sistema de inyección electrónico que permita variar externamente la presión de inyección, por lo cual se decidió por la opción de conseguir tres inyectores iguales, calibrados a tres presiones diferentes. Si bien esta es una opción válida, tiene el inconveniente que para cambiar la presión es estrictamente necesario desmontar algunas piezas del motor e intervenirlos para cambiar el inyector, por este motivo esta variable se estableció como factor bloqueado. Por otro lado, el banco de pruebas donde se realiza este experimento permite variar de manera externa la velocidad de giro del motor, así como el régimen de carga; estas dos variables son los dos factores del ensayo, en cada factor se utilizarán tres niveles. Como no se conoce la respuesta de las variables a estudiar, el diseño factorial  $3^k$  es una de las alternativas experimentales que permite estudiar efectos de curvatura, además de efectos lineales y de interacción [6]. Como se tienen 3 factores es posible verificar un total de 27 tratamientos.

Actualmente, el análisis de emisiones acústicas está siendo usado como técnica para medir la condición de las máquinas a nivel industrial como discute [7]. La generación de ruido en los motores de combustión interna proviene de fuentes aerodinámicas y mecánicas; las fuentes aerodinámicas se pueden definir como perturbaciones al aire, como pueden ser el fenómeno de turbulencia dentro del exosto y los conductos de admisión; en las fuentes

mecánicas se encuentran el ruido generado entre los contactos, tal como vibraciones, impactos y choques entre superficies como se menciona en [8].

El desarrollo de la combustión en los motores diésel obedece a parámetros de inyección, como lo pueden ser la cantidad de combustible y la presión de inyección media. De igual manera, la variación de estos parámetros de inyección influye sobre la vibración del bloque del motor como fue investigado en [9]. Los inyectores deficientes que no pueden ejecutar esa función producirán fallos, golpeteo, sobrecalentamiento del motor, pérdida de potencia, humo negro en el escape o mayor consumo de combustible [10].

Para agregar, en un experimento conducido sobre un motor diésel a diferentes regímenes de giro, se observa que, al aumentar la velocidad del motor, el RMS de los valores de aceleración aumentaba en los tres ejes [11].

Sin embargo, sabiendo ya la importancia de los factores a controlar, era necesario buscar la manera de poder adquirir todas las señales, y estas ser llevadas finalmente a un computador. Para esto fue necesario utilizar sensores y un módulo de adquisición de datos; por su parte la **Figura 1** ilustra un diagrama de cómo se realizan las conexiones para este experimento.

Adicionalmente se hace uso de un opacímetro conectado al exosto del motor utilizado, con el fin de mostrar cómo es conectado este dispositivo en este experimento, se enseña en la **Figura 2** un diagrama representativo. Además, se aclara que la instalación se conserva igual para todas las pruebas, así como el procedimiento que debe seguirse a la hora de manipular el instrumento para medir la opacidad.

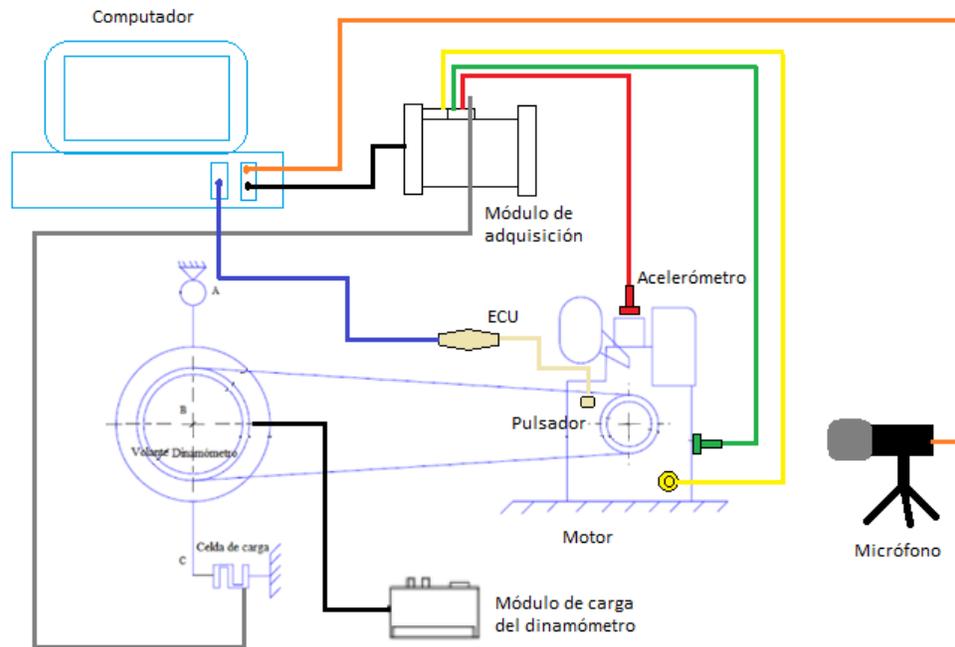
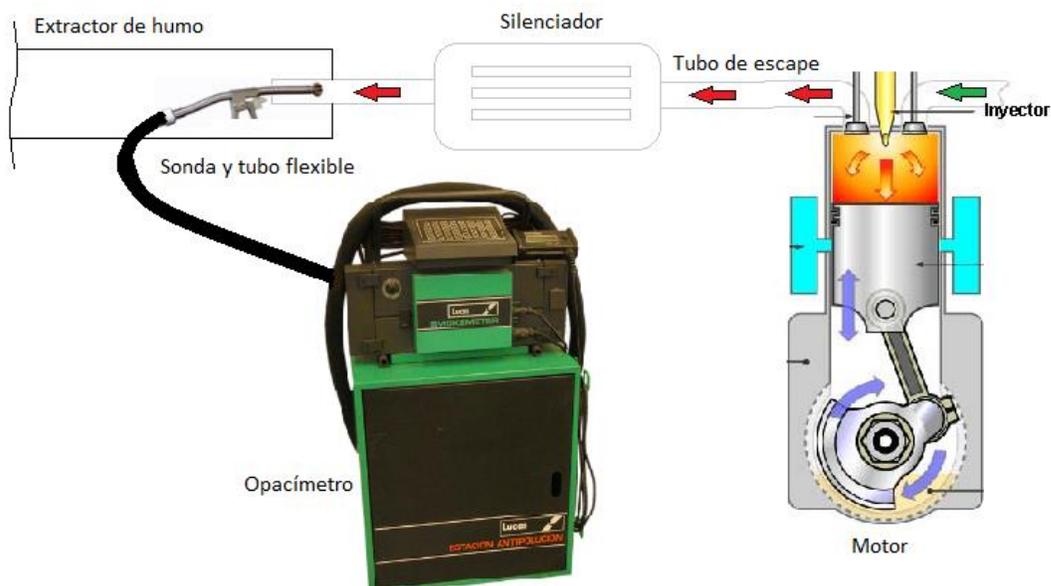
Después de realizar el experimento en el banco de pruebas, se obtienen los resultados mostrados en la

**Tabla 1**, en la que se observa claramente que la presión de apertura de los inyectores coincide con los valores que se emplearon en las etiquetas de presión de inyección. Se aprecia que para los tres inyectores el volumen es similar, presentando un valor máximo para el inyector calibrado a 20 MPa que corresponde con el inyector operando en condiciones normales.

La **Tabla 2** muestra los diferentes tratamientos que requiere este ensayo, además de los diferentes niveles que posee cada variable.

**Tabla 1.** Características de los inyectores.

INYECTOR	PRESIÓN DE INYECCIÓN [MPa]	VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]
180	18,36	0,085
200	20,00	0,090
220	22,00	0,086

**Figura 1.** Diagrama de conexiones.**Figura 2.** Diagrama instalación del opacímetro.

**Tabla 2.** Descripción de los tratamientos.

	FACTORES CONTROLABLES			Tratamiento
	Presión de inyección	Carga	Velocidad de giro	
Niveles	18 MPa	BAJA	1800 RPM	1
			2400 RPM	2
			3000 RPM	3
		MEDIA	1800 RPM	4
			2400 RPM	5
			3000 RPM	6
		ALTA	1800 RPM	7
			2400 RPM	8
			3000 RPM	9
	20 MPa	BAJA	1800 RPM	10
			2400 RPM	11
			3000 RPM	12
		MEDIA	1800 RPM	13
			2400 RPM	14
			3000 RPM	15
		ALTA	1800 RPM	16
			2400 RPM	17
			3000 RPM	18
	22 MPa	BAJA	1800 RPM	19
			2400 RPM	20
			3000 RPM	21
		MEDIA	1800 RPM	22
			2400 RPM	23
			3000 RPM	24
		ALTA	1800 RPM	25
			2400 RPM	26
			3000 RPM	27

Es importante añadir que la matriz mostrada en la **Tabla 2** será repetida en tres oportunidades por lo que se tendrá entonces, para cada tratamiento, un total de tres pruebas con su respectiva base de datos.

## CAPÍTULO III

### 3. ADQUIRIR SEÑALES DE VIBRACIÓN, ACÚSTICAS Y DE EMISIÓN DE GASES

#### 3.1. PREPARACIÓN DE LAS PRUEBAS

Inicialmente se prepara toda la instalación de los sensores y puesta a punto del motor, además se realiza un programa en el software computacional MatLab para adquirir y procesar la información recolectada. En este programa se registran 9 señales como lo son vibración en X, Y, Z, acústicas, golpeteo, MAP, carga, velocidad de rotación y presión en la cámara, las cuales son graficadas y registradas a una frecuencia de 52800 Hz con el fin de aportar esta información a diferentes investigadores a los cuales le resultaba útil, y basados en estudios similares como en [12]. Es importante advertir que la señal de presión en cámara solo fue registrada para el inyector de 20 MPa, para los demás inyectores este sensor fue desconectado.

Tres acelerómetros son instalados como se muestra en la **Figura 3**, con el objetivo de medir en los tres ejes, y que además se encuentren en zonas donde se puedan medir las aceleraciones. En este sentido y sabiendo que en el laboratorio se han llevado a cabo experimentos en dónde se precisó de la lectura de señales de vibración aportadas por los acelerómetros, se consultó a los investigadores que participaron en dichas pruebas y que en su momento realizaron un análisis de densidad espectral, para conocer los puntos en los que los acelerómetros replicaban con mayor fidelidad la curva de presión contra ángulo de giro, con el fin de conocer los puntos exactos en donde los sensores presentaron mayor sensibilidad y exactitud.

El micrófono es ubicado a un metro de distancia de la motor basados en un estudio realizado sobre un motor diésel mono cilíndrico en el cual se analizan variables similares a las de este proyecto [13]. También es apoyado en un trípode sobre una mesa, para evitar que personas cerca interfieran con la señal captada por el sensor como expone [14]. Lo anteriormente descrito se enseña en la **Figura 4**.

**Figura 3.** (a) acelerómetro Y, (b) acelerómetro X, (c) acelerómetro Z.



**Figura 4.** Montaje del micrófono.



Significa entonces que ya tenidas todas las instalaciones de los instrumentos de medida faltaba la preparación del motor para la toma de todos los datos. El procedimiento que es mencionado a continuación, se realiza para todas las réplicas del experimento y consiste en que inicialmente, se enciende y calienta el motor por un tiempo, luego se ajusta la velocidad

de giro utilizando el método ya mencionado y se observa la información adquirida por el computador y enseñada en la **Figura 5**.

Finalmente, se adapta el potenciómetro del módulo de carga del dinamómetro, se corre la prueba de Matlab, y la secuencia del opacímetro; este equipo registra 4 medidas las cuales posteriormente son llevadas a una hoja de cálculo en la herramienta EXCEL para luego ser graficadas.

**Figura 5.** Velocidad de giro ajustada en sus tres niveles.



### 3.2. TOMA DE LAS MUESTRAS

La adquisición de las señales se realizó mediante un experimento en donde se efectuaron todos los tratamientos y réplicas de un inyector por día, evaluando primero el de 20 MPa, seguido del de 18MPa y por último el de 22 MPa; a la hora de realizar estas pruebas se garantiza aleatoriedad como se muestra en la, cabe resaltar que se corre la matriz tres veces una tras otra para minimizar el error.

Por último, a la hora de guardar los archivos para generar la base de datos, se establece un nombre ruta para poder identificar y organizar toda la información.

**Tabla 3.** Matriz experimental aleatoria.

Presión de inyección	Tratamiento	Carga	RPM
18 MPa	7	A	1800
	3	B	3000
	8	A	2400
	2	B	2400
	6	M	3000
	5	M	2400
	4	M	1800
	9	A	3000
	1	B	1800
20 MPa	13	M	1800
	15	M	3000
	16	A	1800
	18	A	3000
	17	A	2400
	12	B	3000
	11	B	2400
	10	B	1800
	14	M	2400
22 MPa	21	B	3000
	27	A	3000
	23	M	2400
	24	M	3000
	20	B	2400
	26	A	2400
	22	M	1800
	25	A	1800
	19	B	1800

Respecto a la opacidad, es posible mencionar que durante el tiempo que se toma esta lectura, el instrumento realiza 4 pruebas y de estas calcula un promedio, y el equipo devuelve los

cinco valores en pantalla; estos datos son guardados en una hoja de cálculo, y con los cuales se realiza una posterior evaluación. La **Tabla 4** enseña los datos tomados al medir los gases de escape del motor.

**Tabla 4.** Datos tomados con el opacímetro para la primera réplica.

Presión de inyección	Tratamiento	Carga	RPM	Opacidad HSU	Opacidad				offset
18 MPa	7	A	1800	0,825	1	0,8	0,8	0,7	0
	3	B	3000	1,75	2,6	1,4	1,5	1,5	0,2
	8	A	2400	3,025	3,6	3,3	2,8	2,4	-0,1
	2	B	2400	0,725	0,9	0,7	0,7	0,6	0
	6	M	3000	8,6	9,4	9,5	8,5	7	0,1
	5	M	2400	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0
	4	M	1800	0,425	0,4	0,4	0,4	0,5	0
	9	A	3000	4,625	5,4	4,6	4,8	3,7	0,1
	1	B	1800	0,325	0,4	0,3	0,3	0,3	0
20 MPa	13	M	1800	1,5	1,5	1,5	1,4	1,6	0
	15	M	3000	7,9	6,2	7	7,9	8,8	0
	16	A	1800	3,3	2,1	2,7	3,3	3,9	0,01
	18	A	3000	13,8	9,3	11,6	14	15,9	0,02
	17	A	2400	3,7	3,6	4	3,6	3,7	0
	12	B	3000	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	0
	11	B	2400	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,2
	10	B	1800	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,1
	14	M	2400	2,4	2,5	2,4	2,2	2,1	0,1
22 MPa	21	B	3000	2,025	1,9	1,9	2,2	2,1	0
	27	A	3000	4,3	4,4	4,6	3,8	3,6	0,1
	23	M	2400	0,975	1,1	1	0,9	0,9	0
	24	M	3000	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	0,1
	20	B	2400	0,625	0,6	0,7	0,6	0,6	0
	26	A	2400	1,6	1,6	1,5	1,7	1,6	0,1
	22	M	1800	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,1
	25	A	1800	0,85	0,9	0,8	0,9	0,8	0,1
	19	B	1800	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1

## CAPÍTULO IV

### 4. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES MEDIDAS

#### 4.1. CONFIRMACIÓN DE NIVELES DE CARGA

Existe la forma de convertir los datos adquiridos directamente de la celda de carga en valores de fuerza, y momento [15]; en el orden de las ideas se toma una media de la señal de carga en cada prueba, buscando con esta hallar un valor del momento promedio, para cada uno de los 81 ensayos. Para poder confirmar que en este proyecto se tenían tres niveles de carga distintos, y poder cuantificarlos, se procede a realizar el producto entre el momento y la velocidad de giro para obtener un valor de potencia promedio; en esta ocasión hay que resaltar que, como el ajustar la velocidad de giro en un valor exacto y además estable mediante el método utilizado se hacía complicado, se debe mencionar que el cálculo de potencia realizado puede diferir en  $\pm 12\%$ . La **Tabla 5** muestra los cálculos para la potencia con el inyector de 18 MPa.

Las **Figura 6**, **Figura 7**, **Figura 8**. Enseñan las gráficas obtenidas de los valores de potencia para cada velocidad y carga; mostrando los tres niveles de presión de inyección por separado. Es importante resaltar que para efectuar estas graficas primero se hace necesario realizar una normalización de los datos atípicos, la prueba de Grubbs utiliza una estadística de prueba, T, que es la diferencia absoluta entre el valor atípico,  $X_0$ , y el promedio de la muestra  $\bar{x}$  dividida por la desviación estándar de la muestra, s [16]. Para poder realizar esta prueba primero se toma el promedio y la desviación estándar para los 9 tratamientos de cada inyector, teniendo en cuenta los datos de los tres inyectores para cada cálculo.

Con referencia a lo anterior se utiliza la ecuación (1) calculando el numero T el cual es comparado con la distribución Tstudent tabulado (ver); tomando este valor como crítico se puede decir que los números T calculados que pasen este límite, se toman como datos atípicos y no son tenidos en cuenta para presentar las gráficas.

$$T = \frac{|\bar{x} - x_0|}{s} \quad (1)$$

Donde  $\bar{x}$  representa la media calculada para cada tratamiento, S la desviación estándar de cada tratamiento, y  $x_0$  cada uno de los 81 valores con su respectivo promedio y desviación.

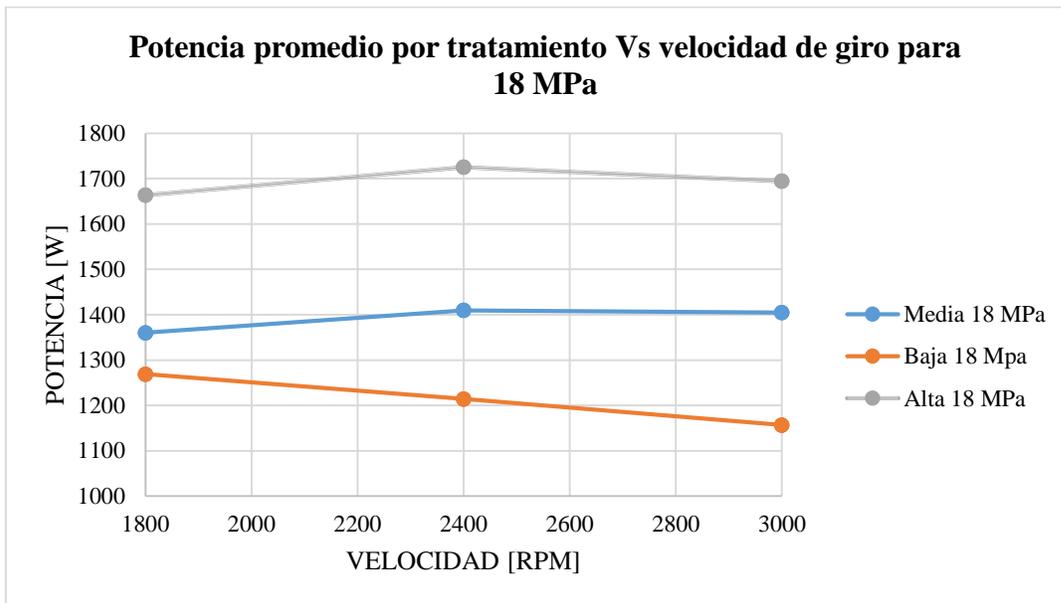
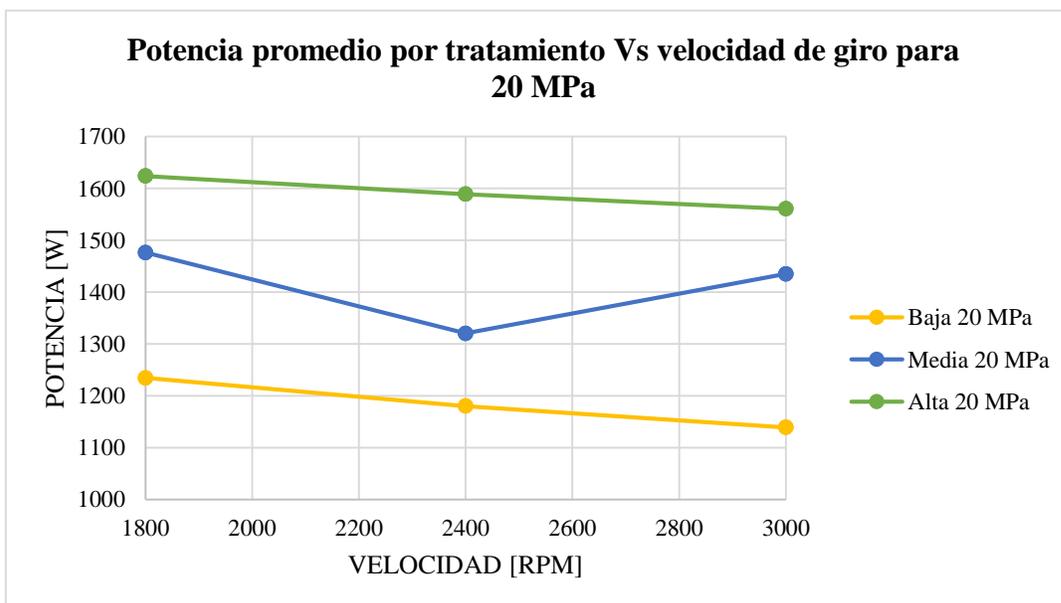
**Tabla 5.** Cálculo de potencia para inyector de 18 MPa.

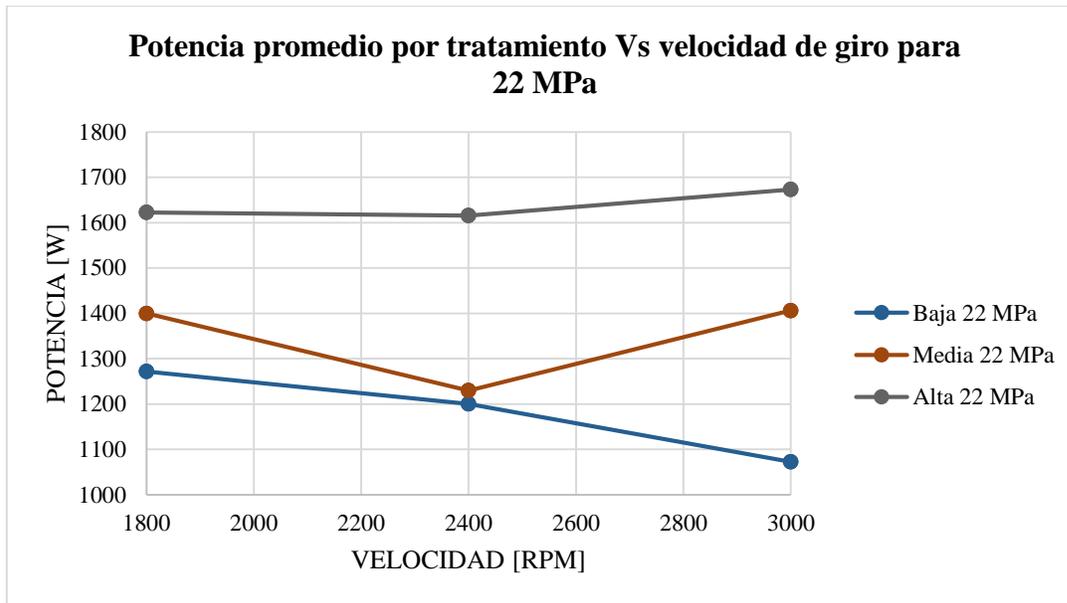
MOMENTO [Nm]	VELOCIDAD	CARGA	POTENCIA [W]
7,087386869	1800	baja	1335,940951
6,692174742	1800	baja	1261,44522
6,417069238	1800	baja	1209,589055
4,411432372	2400	baja	1108,713882
5,003200429	2400	baja	1257,441417
5,079470808	2400	baja	1276,610254
3,167070897	3000	baja	994,9646662
3,924526493	3000	baja	1232,92636
3,955612049	3000	baja	1242,692175
7,416341125	1800	media	1397,947368
7,262110108	1800	media	1368,875506
6,972455017	1800	media	1314,276808
6,112079663	2400	media	1536,133165
5,694091323	2400	media	1431,081237
5,019106554	2400	media	1261,439062
5,021847411	3000	media	1577,659893
4,303324566	3000	media	1351,929284
4,089847469	3000	media	1284,863476
8,796389732	1800	alta	1658,080402
8,580814453	1800	alta	1617,445419
9,098613308	1800	alta	1715,048203
6,766501211	2400	alta	1700,60724
5,560161918	2400	alta	1397,421107
6,963503854	2400	alta	1750,119404
5,607595326	3000	alta	1761,678028
5,208381834	3000	alta	1636,261411
5,364698611	3000	alta	1685,369774

Las Figuras 6, 7 y 8, permiten identificar que existen tres niveles de carga distintos en las pruebas; es posible calcular un promedio total y decir que las cargas baja, media y alta tienden a valores progresivos de potencia como muestra la **Tabla 7**.

**Tabla 6.** Valor  $T_{\text{student}}$  seleccionado

$T_{\text{STUDENT}} = 1.8595$
8 GRADOS DE LIBERTAD
95 % DE CONFIABILIDAD

**Figura 6.** Potencia vs velocidad con inyector de 18 MPa**Figura 7.** Potencia vs velocidad con inyector de 20 MPa.

**Figura 8.** Potencia vs velocidad con inyector de 22 MPa.**Tabla 7.** Valor de potencia por carga.

TENDENCIA TOTAL	
CARGA	POTENCIA [W]
Baja	1193
Media	1340
Alta	1615

Continuamente, de la potencia se puede decir que la presión de inyección con mayor desarrollo fue la de 18 MPa, y también a medida que la presión fue aumentando, la capacidad del motor presentó una relación inversa como exhibe la **Tabla 8**.

**Tabla 8.** Valor de potencia por presión de inyección.

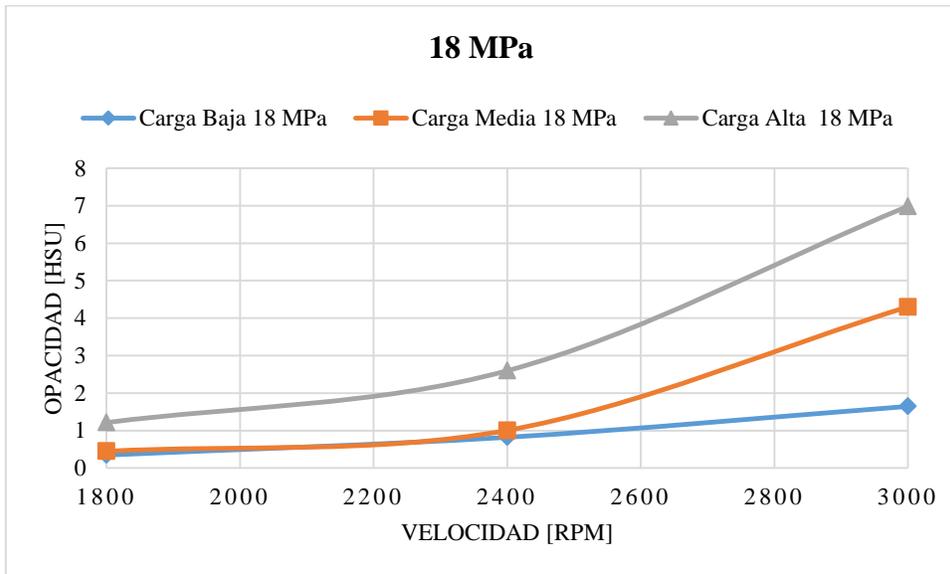
P. INYECCIÓN [MPa]	POTENCIA [W]
18	1421
20	1371
22	1356

#### 4.2. ANALISIS DE OPACIDAD

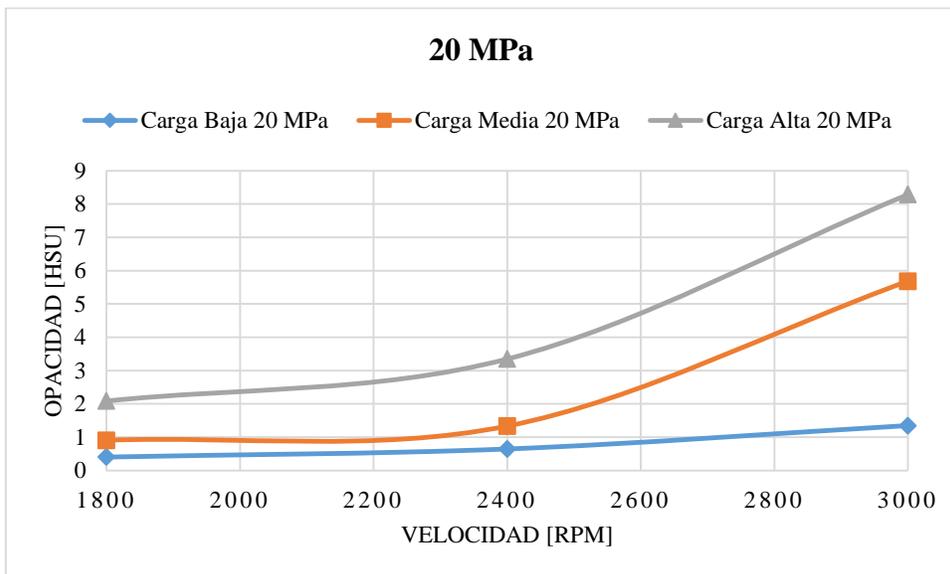
De los datos medidos con el opacímetro se realiza un análisis gráfico, verificando que esta opacidad aumentara directamente con los niveles de carga. La información media recolectada en cada prueba, como se mencionó en el capítulo anterior, es inicialmente ajustada restando

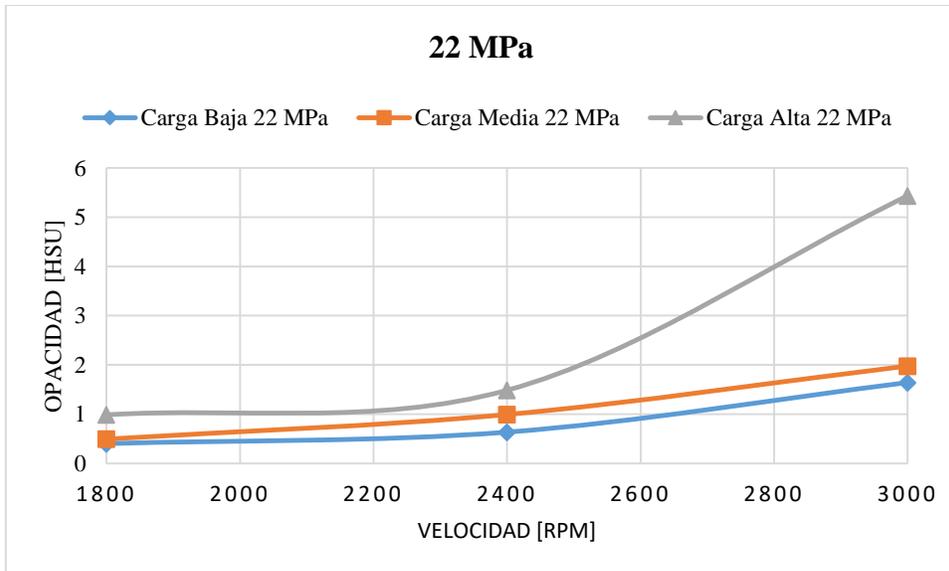
a cada valor su respectivo “offset”; posteriormente se hace un promedio de las tres réplicas de cada tratamiento. Las **Figura 9**, **Figura 10**, **Figura 11** enseñan lo que se obtiene al graficar la opacidad contra velocidad de giro, diferenciando los tres niveles de carga para cada inyector.

**Figura 9.** Opacidad vs velocidad con inyector de 18 MPa.



**Figura 10.** Opacidad vs velocidad con inyector de 20 MPa.



**Figura 11.** Opacidad vs velocidad con inyector de 22 MPa.

También en las Figuras 9, 10 y 11, se advierte que los valores de opacidad dependen no solo de los niveles de carga sino también de la velocidad de giro; notándose un crecimiento no lineal cuando la velocidad supera las 2400 RPM, para carga media y alta; con carga baja se tiene un crecimiento casi lineal con respecto a la velocidad.

De la presión de inyección por separado, y del promedio total de opacidad se puede decir que se presentó mayor opacidad cuando se utiliza inyector de 20 MPa, seguido por el inyector de 18 MPa; sin embargo, como muestra la **Tabla 9** la presión que produce un menor valor de opacidad es la de 22 MPa, lo que es un resultado de esperarse, ya que a mayor presión de inyección debería existir menor opacidad. Además, con respecto a la carga se muestra en la **Tabla 10** que hay un aumento de opacidad al subir estos niveles capacidad.

**Tabla 9.** Opacidad promedio según inyector.

P. INYECCION [MPa]	OPACIDAD [%]
18	2,153703704
20	2,672962963
22	1,559259259

**Tabla 10.** Opacidad promedio según carga.

CARGA	OPACIDAD [%]
BAJA	0,878703704
MEDIA	1,90462963
ALTA	3,602592593

### 4.3. ANALISIS DE VIBRACIONES Y ACÚSTICA

#### 4.3.1. Análisis de componentes principales (PCA)

Una de las necesidades principales a la hora de analizar datos multivariantes es la reducción de la dimensionalidad. Si se describe con precisión la naturaleza de  $p$  variables por medio de un pequeño subconjunto  $r < p$ , se reduce la dimensión a costa de una pequeña pérdida de la información [17].

Usualmente, se observa que pequeñas porciones de nuevas variables del orden del 20% con alta dependencia tienden a explicar el 80% de la variabilidad de los datos [17]. El análisis de componentes principales permite reducir la dimensión mediante la creación de nuevas variables llamadas componentes principales, que son combinaciones lineales de las variables originales.

Representar las  $p$  variables en un espacio de dimensión uno es equivalente a sustituir las  $p$  variables por una nueva variable  $z$  que represente de manera óptima los datos. Esto supone entonces que la nueva variable  $z$  debe tener máxima correlación con las originales, o, dicho de otro modo, debe permitir prever las variables originales con elevada precisión. La condición para que, sacrificando la menor cantidad de información sea posible prever los datos observados, es utilizar la variable de máxima variabilidad [17].

Al disponer de los valores de  $p$  variables en  $n$  elementos en una matriz  $M$  de dimensión  $n * p$ , como a las variables se le ha restado el valor de su media, las variables de la matriz  $M$  tienen media cero. Y su matriz de covarianzas viene dada por  $\frac{1}{n} * M'M$ .

Es necesario encontrar entonces un subespacio de menor dimensión que  $p$  tal que al proyectarse sobre él los puntos conserven su estructura con la menor distorsión posible.

Considerando entonces un punto  $x_i$  y una dirección  $a_1 = (a_{11}, \dots, a_{1p})'$  definida por un vector  $a_1$  de norma unidad, la proyección de  $x_i$  es el escalar:

$$z_1 = a_{11}x_{i1} + \dots + a_{1p}x_{ip} = a_1'x_i \text{ Ecuación 2}$$

y el vector que representa esta dirección será  $z_1 a_1$ . Llamando  $r_i$  a la distancia que existe entre el punto  $x_i$  y su proyección sobre la dirección  $a_1$  y sabiendo que es necesario garantizar que la recta que describe la dirección  $a_1$  es aquella que pasa cerca de la mayoría de los puntos, se exige entonces que las distancias entre los puntos originales y sus proyecciones sean lo más pequeñas posible, lo que implica:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n |x_i - z_1 a_1|^2 \text{ Ecuación 3}$$

Al proyectar los puntos sobre su la recta de la dirección  $a_1$  se forma un triángulo rectángulo en donde la hipotenusa es la distancia del punto al origen y los catetos la proyección  $z_i$  y la distancia del punto a la recta  $r_i$ , por teorema de Pitágoras se tiene lo siguiente:

$$x_i'x_i = z_i^2 + r_i^2 \text{ Ecuación 4}$$

Realizando la suma para todos los puntos se tiene:

$$\sum_{i=1}^n x_i'x_i = \sum_{i=1}^n z_i^2 + \sum_{i=1}^n r_i^2 \text{ Ecuación 5}$$

Siendo que el primer miembro de la ecuación (5) es constante, minimizar la suma al cuadrado de la distancia a la recta de todos los puntos es equivalente a maximizar la suma al cuadrado de los valores de las proyecciones. Además, como las proyecciones de  $z_i$  son variables de media cero, maximizar la suma de sus cuadrados equivale a maximizar su varianza. Este es entonces el criterio para encontrar las direcciones de proyección que maximicen la varianza de los datos.

#### 4.3.1.1. Cálculo de las componentes principales

El primer componente principal es la combinación lineal de las variables originales que tiene varianza máxima. Se representarán los valores de este primer componente en un vector  $z_i$  dado por:

$$z_i = X_1 a_1 \text{ Ecuación 6}$$

$z_i$  tiene media nula ya que las variables tienen media cero, por tanto, su varianza será:

$$\frac{1}{n} z'_1 z_1 = \frac{1}{n} a'_1 X' X a_1 = a'_1 S a_1 \text{ Ecuación 7}$$

Donde  $S$  es la matriz de varianzas y covarianzas de las observaciones. Para que la maximización de la ecuación (6) tenga solución es necesario agregar una restricción al módulo del vector  $a_1$  así pues:

$$a'_1 a_1 = 1 \text{ Ecuación 8}$$

Introduciendo esta restricción mediante los multiplicadores de Lagrange:

$$M = a'_1 S a_1 - \lambda (a'_1 a_1 - 1) \text{ Ecuación 9}$$

Se maximiza esta expresión derivando respecto a los componentes de  $a_1$  e igualando a cero como sigue:

$$\frac{\delta M}{\delta a_1} = 2S a_1 - 2\lambda a_1 = 0 \text{ Ecuación 10}$$

Y su solución es:

$$S a_1 = \lambda a_1 \text{ Ecuación 11}$$

Esto implica que  $a_1$  es un vector propio de la matriz  $S$  y  $\lambda$  su respectivo autovalor. Para determinar cuál vector propio de la matriz  $S$  es la solución de la ecuación 9 se multiplica por  $a'_1$

$$a'_1 S a_1 = \lambda a'_1 a_1 \text{ Ecuación 12}$$

Por lo que se concluye que  $\lambda$  es la varianza de  $z_1$  y como este es el valor que se desea maximizar,  $\lambda$  será entonces el mayor valor propio de la matriz  $S$ . Su vector asociado  $a_1$  contiene los componentes de cada variable en el primer componente principal.

#### 4.3.2. Concatenado Matlab

El programa de adquisición que se empleó para la toma de datos se corrió con una frecuencia de muestreo de 52000 Hz durante un periodo de 10 segundos para cada uno de los tratamientos y sus respectivas pruebas. Es decir, en diez segundos, por cada sensor se registraron 512000 valores. Teniendo en cuenta entonces que las variables de interés son las

vibraciones capturadas por los tres acelerómetros dispuestos en los ejes X, Y, y Z, así como también los valores de sonido registrados por el micrófono. Siendo que en total se realizaron 81 corridas correspondientes a las 3 pruebas de cada uno de los 27 tratamientos, al final se obtuvieron entonces 165'888.000 datos. En primera instancia es importante mencionar que la información recopilada por la tarjeta de adquisición se guarda en un vector de 512000 posiciones para cada sensor, lo cual genera un inconveniente a la hora de concatenar la información ya que compilar todos los datos en un vector de aproximadamente 166 millones de posiciones no es práctico para el procesamiento. Por esta razón se crea un programa que llame todos y cada uno de los tratamientos y sus respectivas pruebas valiéndonos de la ruta guía, para cargar toda la información capturada y recortarla para guardarla en un formato diferente que mejore la eficiencia de procesamiento. Para este fin se empleó la función *reshape* de *MatLab* a fin de recortar cada señal y guardar todos los 512000 datos en un formato de 4096\*125, luego, a dicha matriz se le aplica la transpuesta para tener un formato final de 125\*4096 en donde se concatenan todos los datos horizontalmente en 125 filas para cada prueba, es decir, como cada tratamiento tiene tres pruebas, cada tratamiento ocupa 375 filas. Así pues, finalmente se obtiene una matriz **M** de 40500\*4096. En este punto es necesario resaltar que producto del análisis estadístico realizado a los valores de carga que, arrojó un total de cinco valores atípicos que fueron eliminados, todos los valores correspondientes a las cinco pruebas eliminadas fueron omitidos también en la creación de la matriz. Esto generó una modificación en las dimensiones de la matriz **M** que terminó siendo una matriz de 38000\*4096. Al mismo tiempo, este código llama cada valor promedio de opacidad de cada tratamiento y un vector fila de 4 posiciones que contiene las etiquetas de velocidad, presión de inyección, carga y opacidad según la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Etiquetas.

ETIQUETAS			
ITEM/#	1	2	3
Velocidad	1800	2400	3000
Presión	18	20	22
Carga	Baja	Media	Alta

Las etiquetas de velocidad, presión de inyección y carga son un número entero entre 1 y 3, mientras que la etiqueta de opacidad es el valor promedio de opacidad para cada uno de los

27 tratamientos. De este modo, se crea entonces la matriz  $M$  que contiene toda la información recopilada además de una matriz de etiquetas.

Como se mencionó anteriormente, la información de cada tratamiento está guardada en 375 filas, esto quiere decir que en la matriz  $M$  desde la fila 1 hasta la 375 se encuentra el primer tratamiento, a partir de la fila 376 y hasta la 750 se encuentra el segundo y así sucesivamente. En ese sentido, se hace explícito que cada una de esas 375 filas lleva la misma etiqueta por lo que se empleó la función `repmat` de MatLab para clonar cada etiqueta 375 veces. En cuanto que fue necesario tener en cuenta que existían algunos tratamientos de 250 filas, resultado de las pruebas eliminadas, finalmente se creó una matriz de etiquetas con una dimensión de  $38000 \times 4$  en donde todas y cada una de las etiquetas corresponden a su respectivo tratamiento.

Una vez obtenida la matriz de datos y la matriz de etiquetas, se procede entonces a crear la matriz de características. Con este propósito se emplea un ciclo `for` que carga la matriz de datos y en cada iteración calcula los siete momentos estadísticos de cada fila, y al mismo tiempo, con la función `spectrogram` de MatLab, obtiene la transformada rápida de Fourier para los valores de cada fila. Los valores de la transformada rápida de Fourier se concatenan horizontalmente en una sola fila, y posteriormente se concatenan también en la misma fila los valores de los siete momentos estadísticos. En este punto es preciso mencionar que este último programa tardó mucho tiempo en compilarse debido a la gran cantidad de datos que se estaban manejando, por lo que se optó por omitir la información de los acelerómetros en el eje  $X$  y  $Z$  y conservar únicamente los valores del acelerómetro en  $Y$  ya que este se encuentra ubicado en el mismo plano en el que se desplaza el pistón, cerca de la culata. Así pues, con esta metodología se creó la matriz de características  $CC$  de  $19000 \times 4111$  donde la función `spectrogram` aportó 4104 además de los siete momentos estadísticos.

Para analizar la información de los otros dos sensores que fueron omitidos por eficiencia computacional se optó por usar un ciclo `for` similar que realizara el mismo procedimiento, pero que en lugar de guardar los valores de la transformada rápida de Fourier (4104), calculara también los siete momentos estadísticos para estos valores y los guardara. De esta manera se logró construir la matriz de características  $CC1$  con una dimensión de  $38000 \times 14$  que redujo sustancialmente el tiempo invertido en el procesamiento y además permitió comparar una mayor cantidad de información de una manera más eficiente.

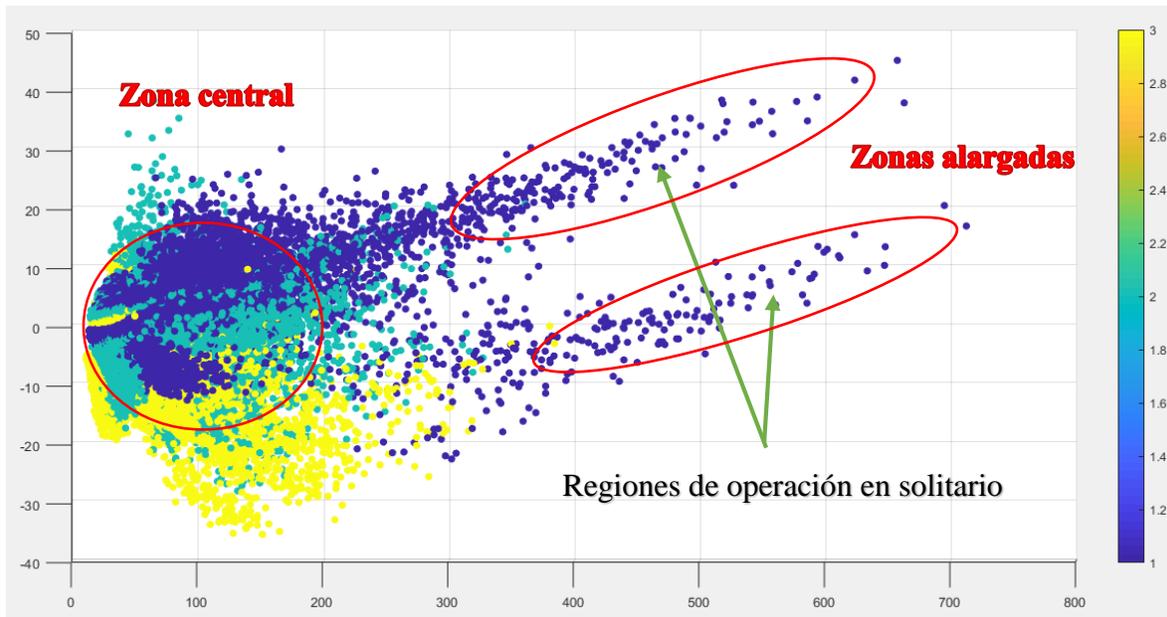
### 4.3.3. Graficas PCA basada en momentos estadísticos

Para averiguar si las lecturas tomadas por los acelerómetros en los dos planos que no se tuvieron en cuenta, proporcionan alguna ventaja al análisis de los datos, se evalúan dos opciones: practicar a la totalidad de los datos la función spectrogram y crear una matriz de características que contenga únicamente el valor absoluto de los valores que entrega dicha función, con lo que tendría una dimensión de  $38000 \times 4111$ . Otra alternativa que presenta una ventaja estratégica en tanto que se ven considerablemente reducidos los tiempos de procesamiento, es construir una matriz realizando los siete momentos estadísticos tanto a los valores devueltos por la función spectrogram como a los datos originales almacenados en la matriz M. De esta manera se obtiene una matriz de características con una dimensión de  $38000 \times 14$ . Se procede a analizar la segunda alternativa.

A continuación, se muestran diferentes vistas de cada uno de los planos de la visualización en cluster de la matriz de características con base en los siete momentos estadísticos.

Observando la **Figura 12** puede apreciarse regiones en donde hay fuerte predominancia de cada uno de los valores de velocidad, siendo 1 velocidad baja, 2 velocidad media y 3 velocidad alta. Así pues, es preciso resaltar que los puntos que corresponden a tratamientos de velocidad alta se concentran en la parte inferior de la figura, los tratamientos de velocidad baja se agrupan principalmente en la parte superior y los tratamientos a velocidad media, aunque con menor presencia tienden a agruparse hacia la mitad. Existen dos regiones alargadas mostradas en la **Figura 12** en las que se puede notar cómo se ubican en solitario, puntos de operación a velocidad baja.

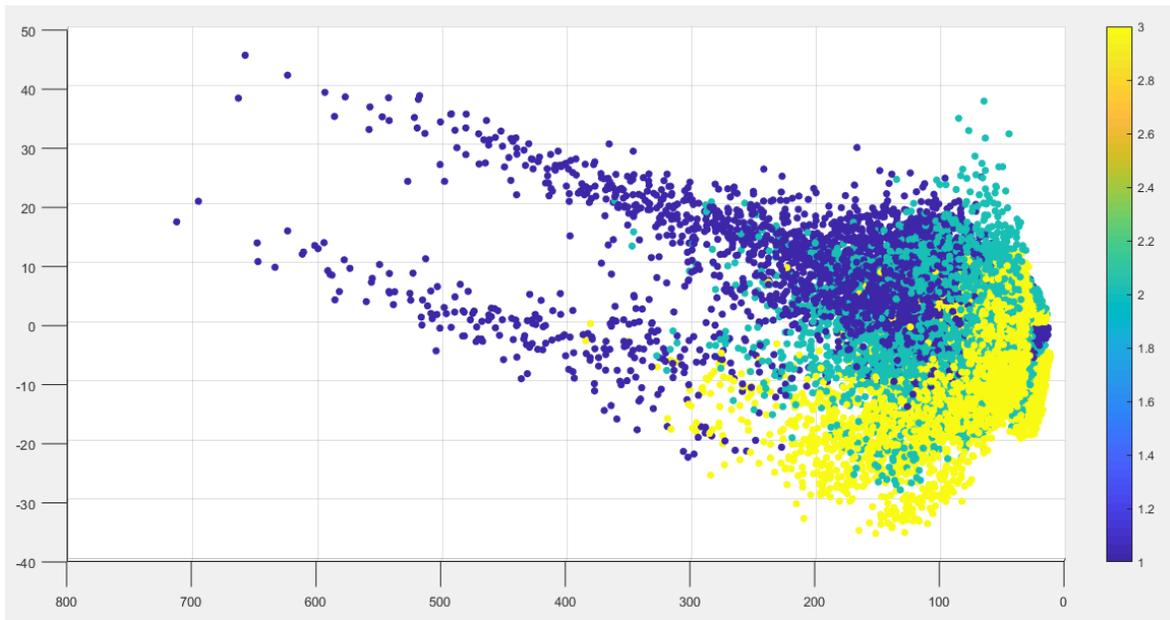
**Figura 12.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, X)



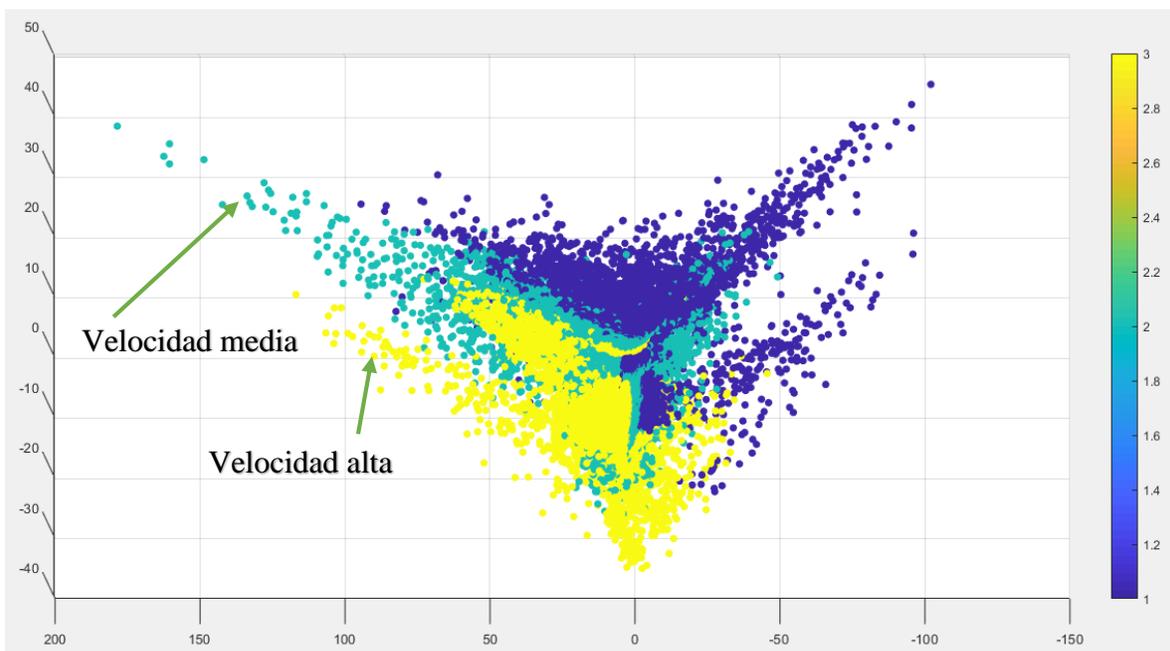
Al observar el mismo plano desde el lado opuesto se aprecia entonces en la **Figura 13** cómo los puntos de operación a velocidad baja se agrupan en un área mayor a lo largo de toda la figura mientras que los puntos de operación a velocidades media y alta se agrupan en la zona central en donde se presenta la mayor densidad de puntos, no obstante cabe resaltar que, si bien los puntos de operación a velocidades media y alta se mezclan en dicha zona, se puede apreciar una marcada tendencia que deja ver cómo, en la parte superior se agrupan mayoritariamente puntos de operación a velocidad media mientras que los puntos de operación a velocidad alta se concentran en la parte inferior.

Analizando el plano ZY se puede evidenciar un marcado comportamiento para cada valor de velocidad. En la zona central se observa una mezcla, aunque con zonas delimitadas de operación para las diferentes velocidades, por ejemplo, se nota cómo los puntos de operación a velocidades altas se agrupan principalmente en la parte frontal de la **Figura 14**, mientras que los puntos de operación a velocidad baja se agrupan en la región superior y se extienden hacia la parte posterior del gráfico. Pueden notarse nuevamente las zonas de operación en solitario de puntos de baja velocidad en la parte derecha de la figura, además, aparecen dos regiones alargadas nuevas hacia la parte izquierda de la figura en donde se agrupan puntos de operación en solitario de velocidad media y alta respectivamente, como se muestra.

**Figura 13.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, -X)

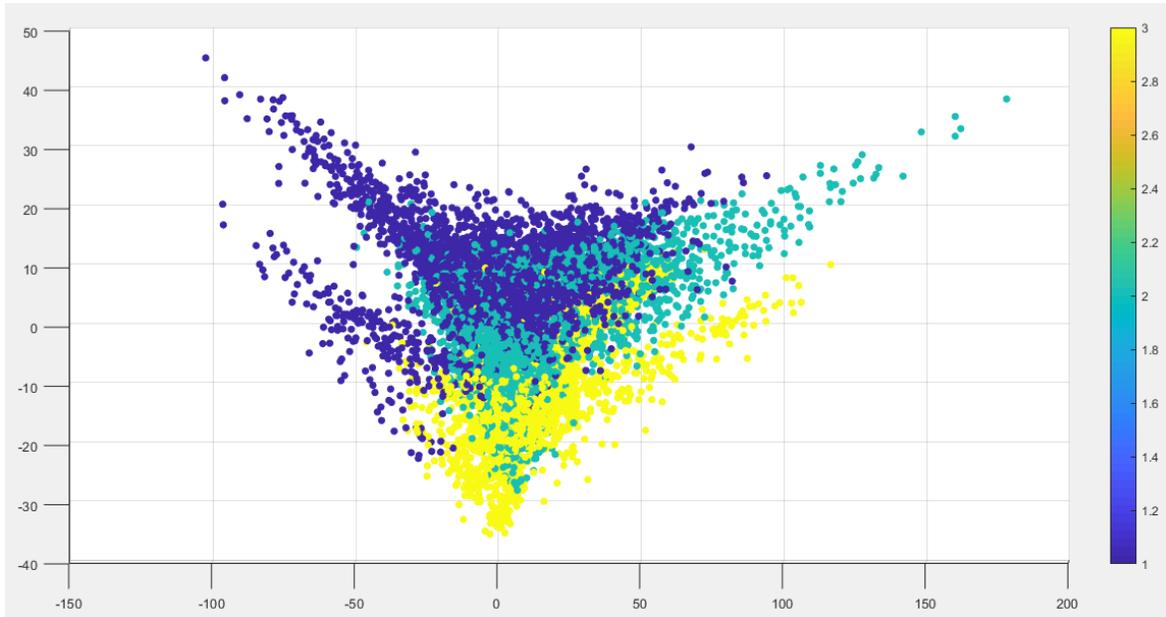


**Figura 14.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, -Y)



Del mismo plano visto desde el lado opuesto es posible observar una tendencia marcada para cada una de las velocidades de operación, siguiendo la tendencia ya mencionada: los valores se agrupan en su mayoría en orden descendente de velocidad de arriba hacia abajo como se muestra en la **Figura 15**.

**Figura 15.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Z, Y)

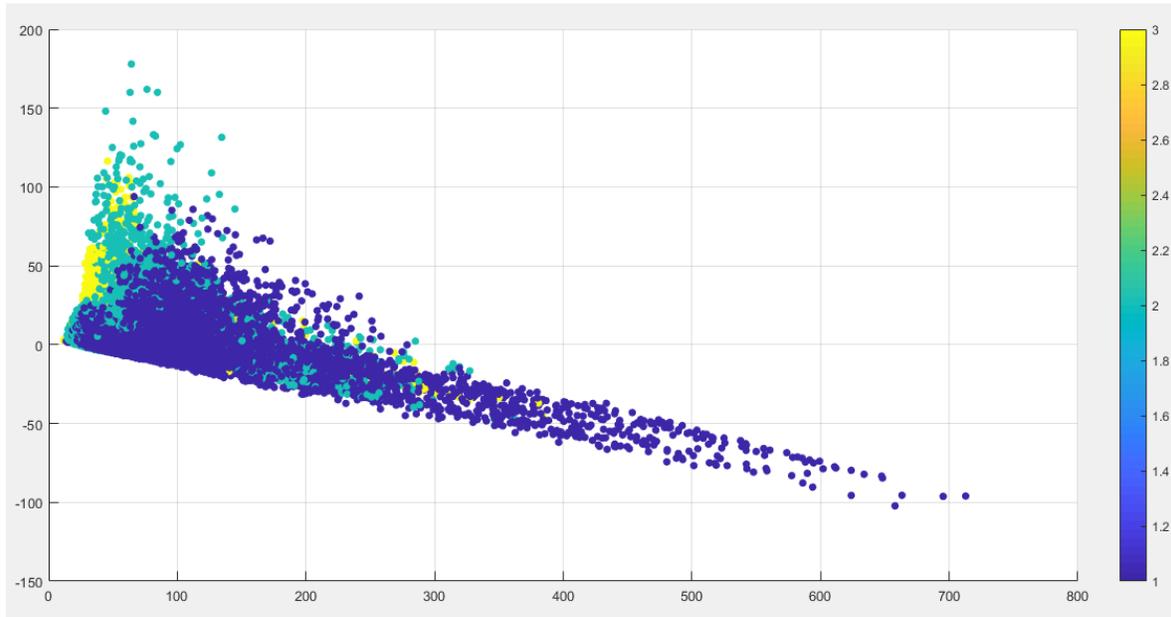


Cuando se estudia la vista YX, ver la **Figura 16**, como se había mencionado anteriormente, los puntos de operación a velocidad baja se extienden a lo largo de la figura en un área mayor, mientras que los puntos de operación de velocidades media y baja se agrupan en la zona central.

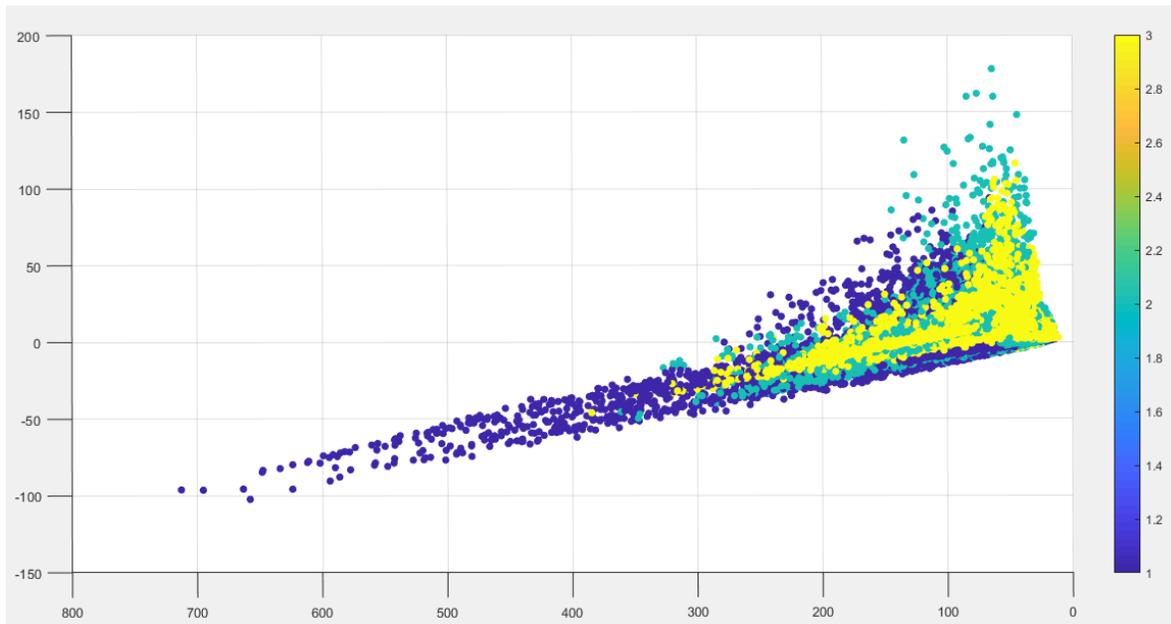
En este caso, se observa que los puntos de velocidad alta se acumulan mayoritariamente cerca del límite izquierdo de la **Figura 16** aunque con presencia reducida. En este plano, se observa además que las dos zonas alargadas de puntos de operación a velocidad baja que se mencionó con anterioridad se ven como una sola.

Mirando el mismo plano, pero desde el lado opuesto, ver **Figura 17**, se descubre un cúmulo importante de puntos de operación a velocidad alta, como se había dicho, hacia el límite derecho de la **Figura 17**. En este plano, se observa con mayor detalle como los puntos de velocidad media y alta se presentan en la zona central de la figura, mientras que los puntos de operación de velocidad baja se distribuyen en un área mayor, y se confirma la existencia de una zona en donde dichos puntos se acumulan sin mezcla.

**Figura 16.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Y, X)



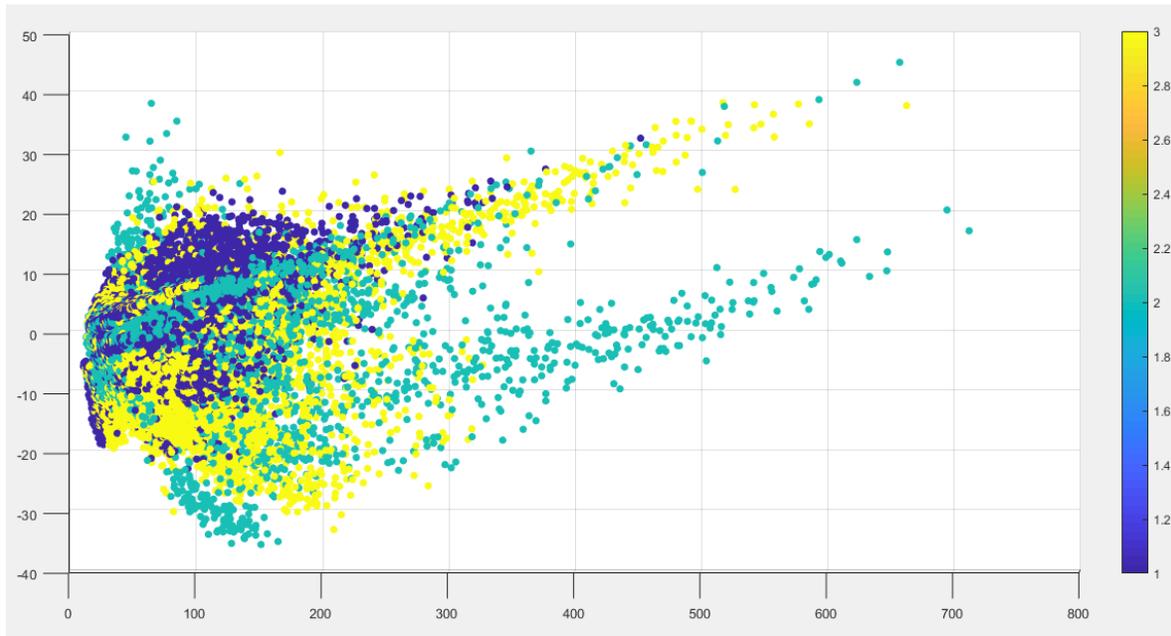
**Figura 17.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de velocidad. (Y, -X)



Estudiando la etiqueta de presión de inyección (ver **Figura 18**) se puede notar que a diferencia de la etiqueta de velocidad, esta presenta una mayor mezcla. No obstante, es posible reconocer algunas zonas características, por ejemplo, las dos regiones alargadas en donde se acumulan puntos de operación a velocidad baja corresponden a puntos de operación del inyector de 22 MPa y 20 MPa respectivamente, además, no presentan mezcla

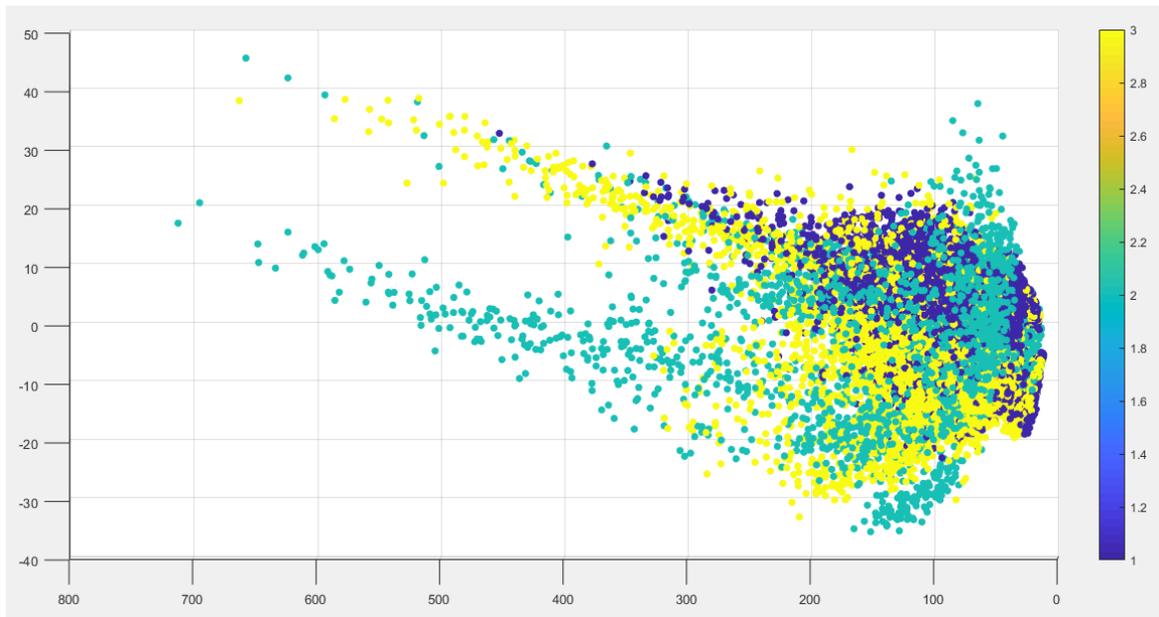
considerable. Por su parte el inyector de 18 MPa agrupa puntos principalmente sobre la región central de la figura, y hacia la parte superior puede notarse una zona en donde este inyector es predominante.

**Figura 18.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, X)



Una vez más, al darle la vuelta a la figura y mirar el plano ZX desde el lado opuesto, ver **Figura 19**, puede verse un comportamiento que no era muy claro anteriormente. Los inyectores de 22 MPa y 20 MPa presentan puntos a lo largo de toda la figura, abarcando un área mayor que los puntos de operación de 18 MPa. También se observa con mayor claridad las mencionadas regiones alargadas que ahora sabemos que son puntos de operación de los inyectores de 22 MPa y 20 MPa a velocidad baja. El inyector de 18 MPa agrupa puntos, como ya se mencionó, en la zona central, pero además, como se observa en la **Figura 19**, dichos puntos se concentran en una región limitada de la figura cerca del cero en el eje X.

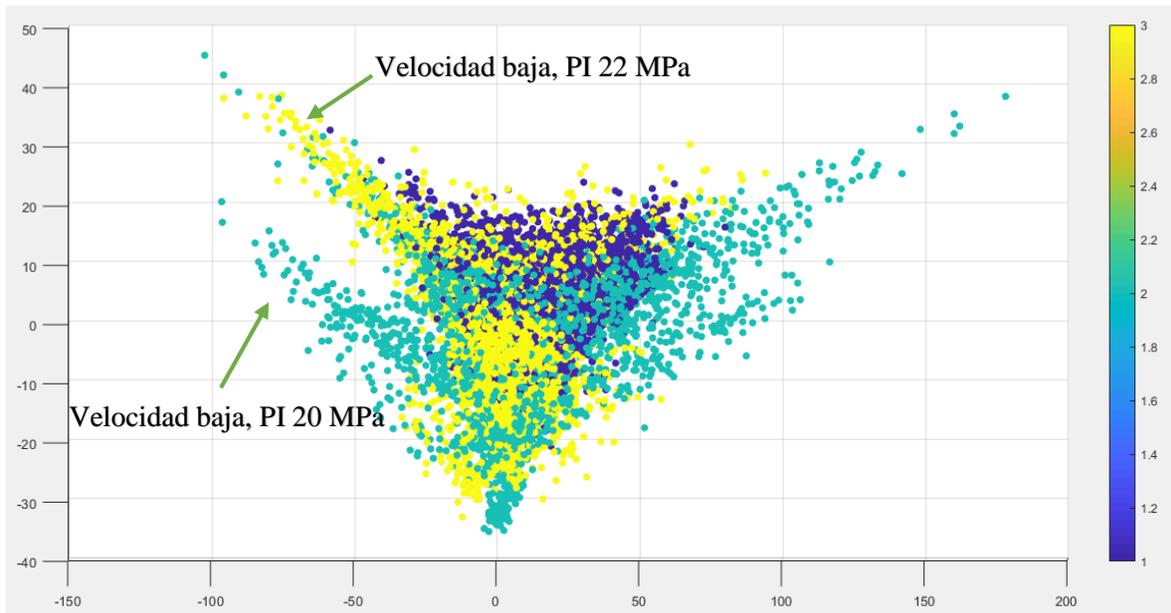
**Figura 19.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, -X)



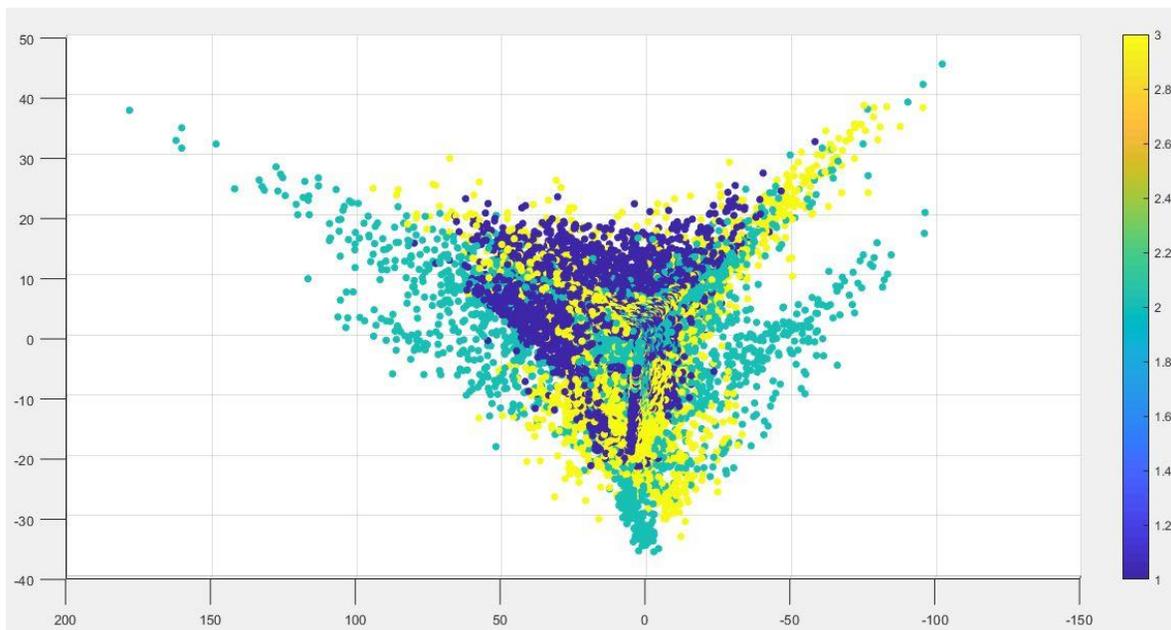
Cuando se observa el eje ZY se evidencia nuevamente una fuerte mezcla de los puntos, ver **Figura 20**. Es preciso resaltar que, en su mayoría, los puntos de operación del inyector de 22 MPa se agrupan predominantemente en el centro de la figura y para valores positivos del eje Y. La **Figura 20** da mayor información sobre las regiones alargadas ubicadas en el sector izquierdo, se sabe que dichas zonas representaban puntos de operación en solitario a velocidad baja, y ahora se puede estar seguros que la zona alargada inferior corresponde también a la operación del inyector de 22 MPa. Mientras que la zona alargada inferior corresponde a puntos de operación a velocidad baja para el inyector de 20 MPa.

Observando el mismo plano por el lado opuesto, mostrado en la **Figura 21**, se aprecia un sector en donde se agrupan mayoritariamente puntos de operación con inyector de 18 MPa que visto desde el otro lado, era bastante reducido. Se nota pues, que la operación con el inyector de 18 MPa es predominante en la zona central en donde también se observan cúmulos importantes de puntos de operación con inyector de 22 MPa y 20 MPa en menor medida.

**Figura 20.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, Y)

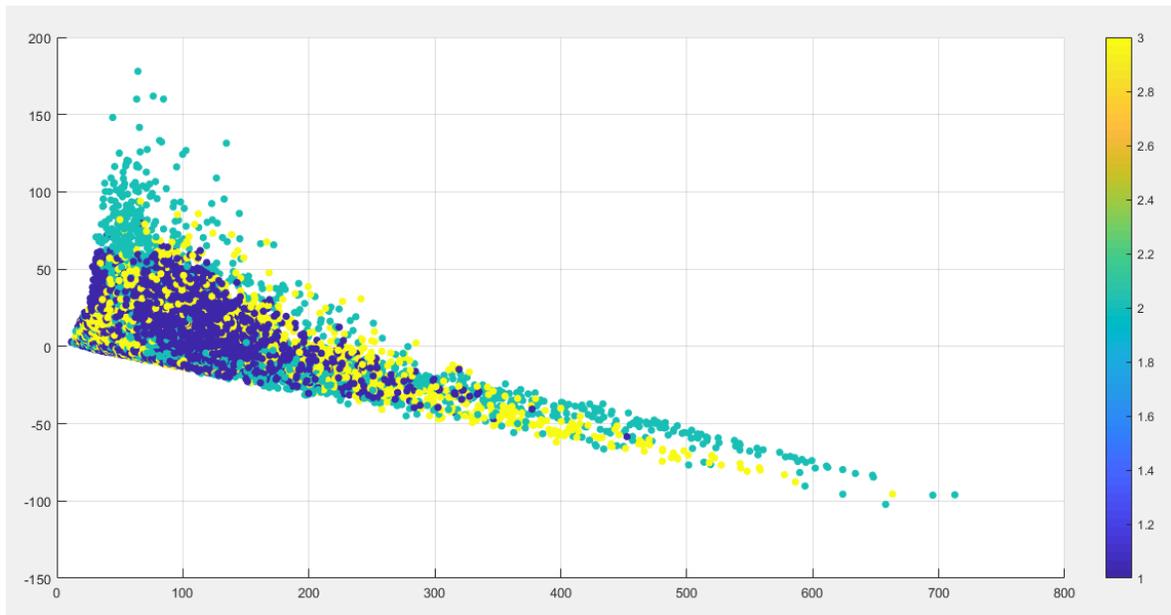


**Figura 21.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Z, -Y)



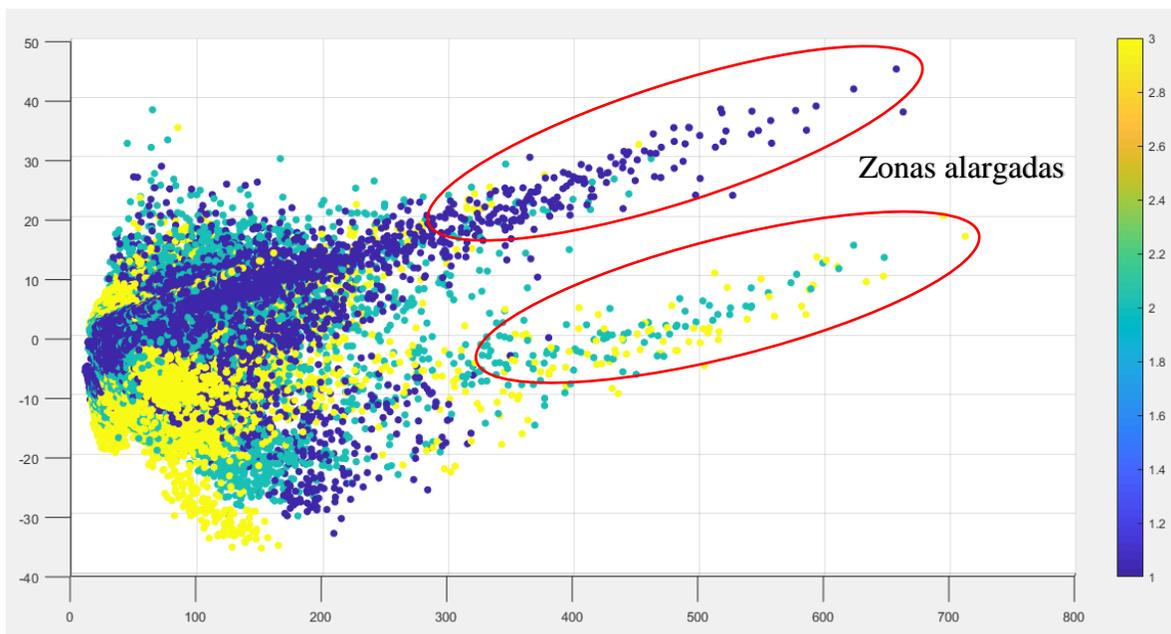
Cuando se analiza el plano YX (**Figura 22**) se evidencia, como se mencionó previamente, que la zona de los puntos de operación para el inyector de 18 MPa es reducida y está concentrada en la parte central de la figura cerca del límite izquierdo y hasta la mitad mientras que los puntos de operación de 20 MPa y 22 MPa se distribuyen a lo largo de toda la figura.

**Figura 22.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de presión de inyección. (Y, X)



La **Figura 23** muestra los puntos de operación según su valor de carga enumerados de menor a mayor, es decir el número uno equivale a carga baja, el número dos es carga media y el tres, carga alta

**Figura 23.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, X)

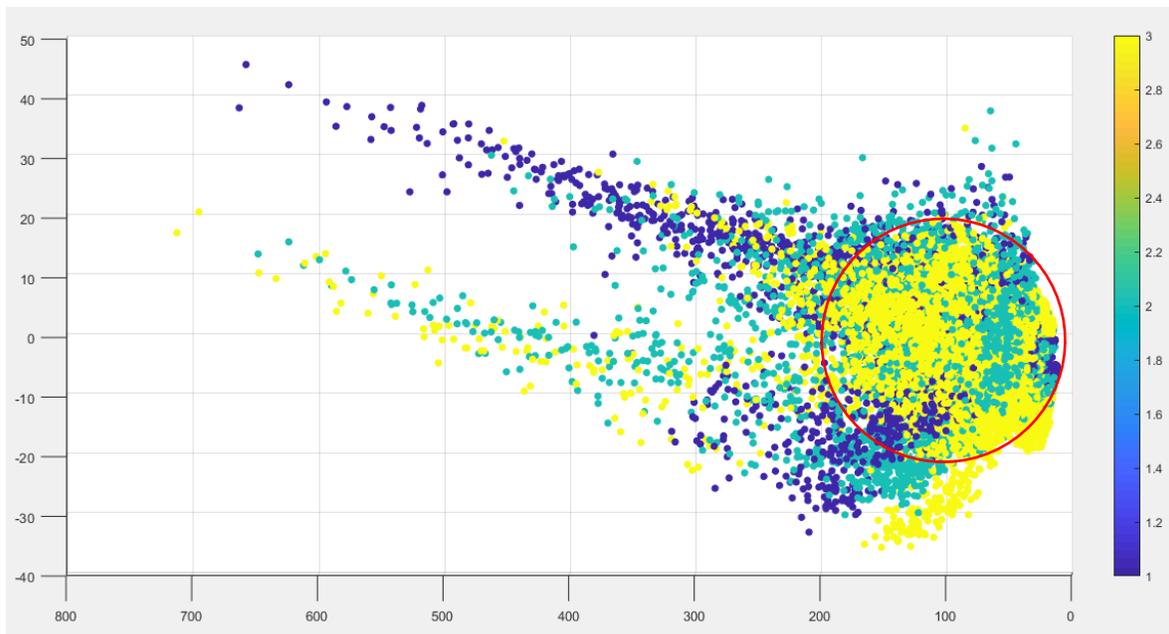


Si bien la figura muestra una fuerte mezcla de todos los valores, resaltan algunas zonas en donde hay operaciones bien marcadas. Por ejemplo, los puntos de operación de carga baja se

concentran en la parte superior y se extiende hacia una de las zonas alargadas que anteriormente se identifica como puntos de operación a velocidad baja, con inyector de 22 MPa y además, dicha zona coincide con una región en donde se agrupan predominantemente puntos de operación de carga baja. Por otro lado, en la zona alargada inferior, anteriormente identificada como puntos de operación del inyector de 20 MPa a velocidad baja, se agrupan puntos de operación tanto a carga media como a carga alta. Cabe resaltar que en la zona central y para valores negativos del eje Z es posible observar un cúmulo importante de puntos de operación a carga alta.

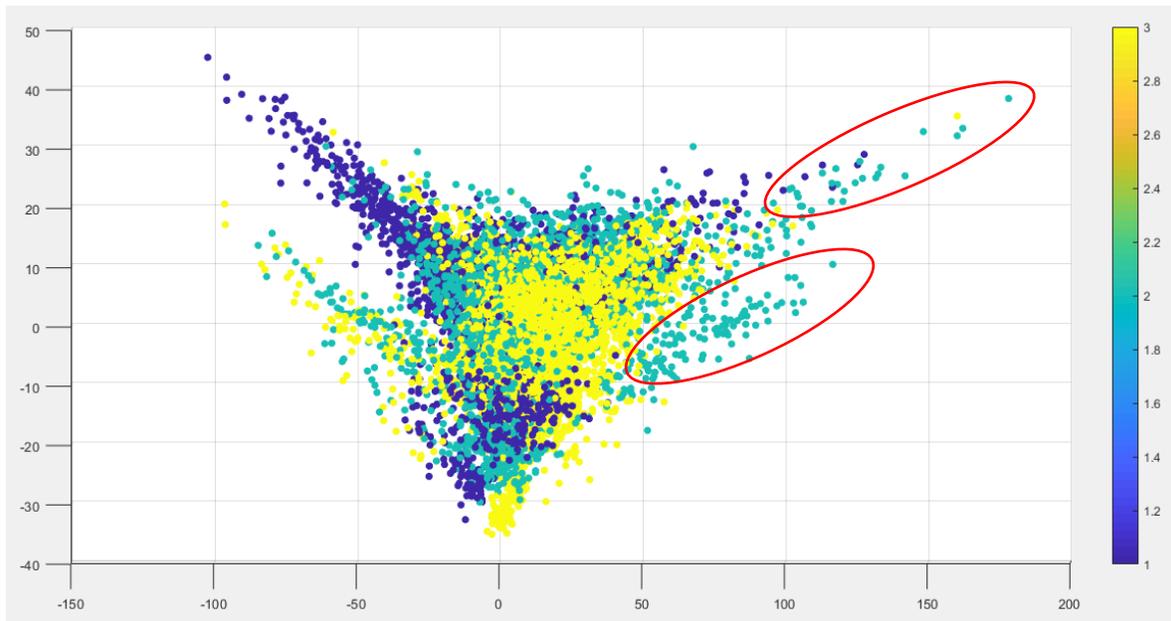
Observando el plano ZX por la cara opuesta como muestra la **Figura 24**, se confirma entonces la presencia predominante de puntos de operación con carga alta sobre la zona central, en donde sin embargo, se presenta una fuerte mezcla.

**Figura 24.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, -X)



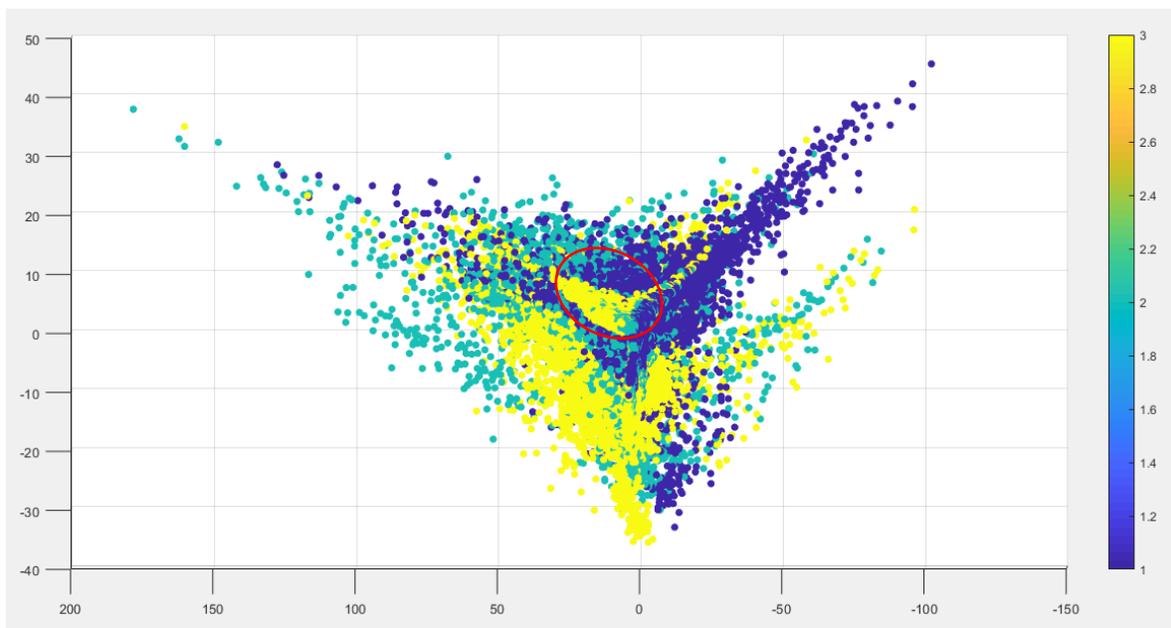
En la **Figura 25** se puede evidenciar cómo las zonas alargadas de la parte derecha corresponden a puntos de operación a carga media. La zona alargada superior derecha corresponde entonces a una zona de operación del inyector de 20 MPa a velocidad media y carga media, mientras que la zona alargada inferior derecha corresponde a puntos de operación de 20 MPa a velocidad alta y carga media.

**Figura 25.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, Y)



Como puede apreciarse en la **Figura 26**, existe un cúmulo de puntos de operación a carga alta cerca del cero y hacia valores positivos en Y y Z en una zona en donde se presenta una fuerte mezcla de puntos de las tres cargas.

**Figura 26.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de carga. (Z, -Y)



Por último, tomando los valores de opacidad medidos durante el experimento se crean tres rangos de opacidad, como se ve en la **Tabla 12**.

**Tabla 12.** Rangos de opacidad.

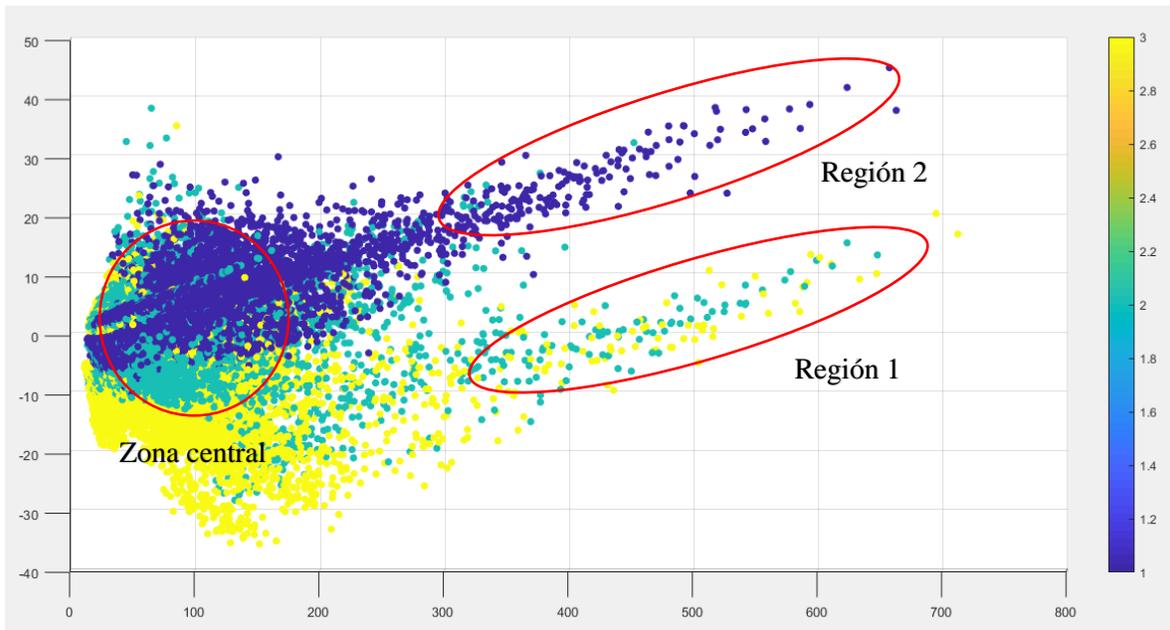
RANGOS DE OPACIDAD		
Item\valor	mínimo [%HSU]	máximo [%HSU]
Baja	0,0	2,8
Media	2,8	5,5
Alta	5,5	8,3

Existiendo solo tres rangos de opacidad en lugar de 27 valores individuales, es mucho más sencillo interpretar la relación que tiene la variable opacidad, ya que de esta manera, es posible visualizar el lugar en donde se concentran todos los puntos que pertenecen a cada uno de los rangos.

La **Figura 27** es una vista del plano ZX en donde se nota que todos los puntos que pertenecen al mismo rango tienden a concentrarse en zonas diferentes, aunque existen zonas de mezcla. La *región 1* es un claro ejemplo de la influencia de los niveles de carga sobre la opacidad ya que como puede verse, los puntos de opacidad media se concentran en una región en donde, como se ilustra en la **Figura 23**, se agrupan puntos de operación a carga media. A su vez, los puntos correspondientes al rango de alta opacidad se concentran en una zona donde se agrupan puntos de operación a carga alta. Cuando se examina el lugar donde se presentan los rangos de baja opacidad, es posible inferir que están relacionados con el régimen de giro de 1800 RPM.

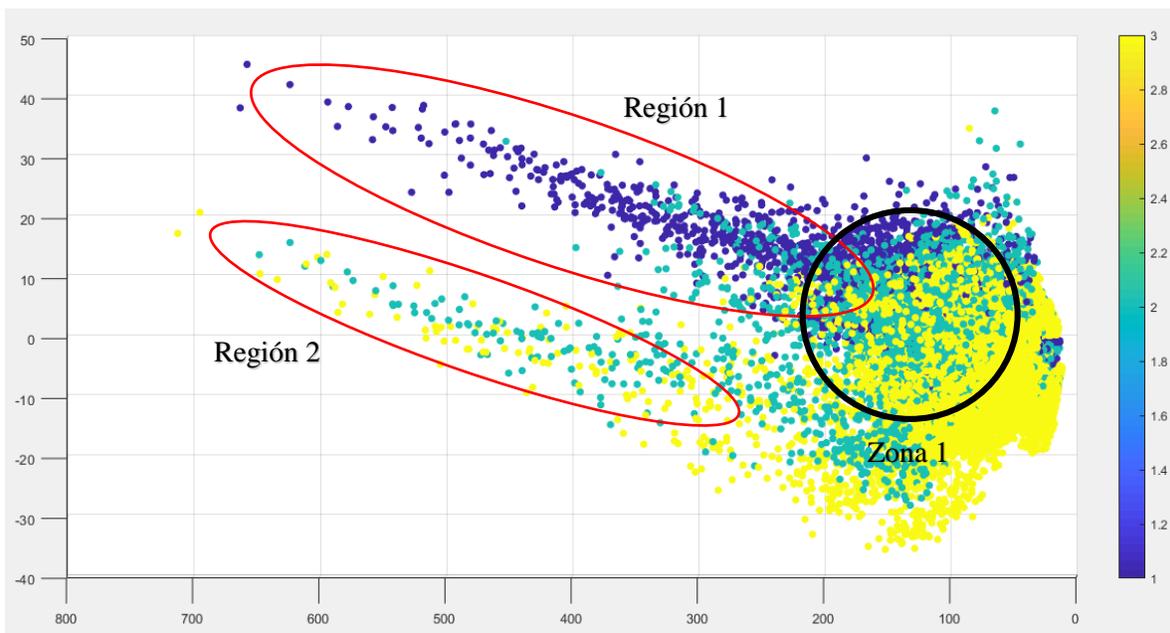
En la *región 2* de la **Figura 27** se aprecia cómo se agrupan puntos de baja opacidad en una de las zonas que fue identificada como puntos de operación del inyector de 22 MPa a velocidad baja y carga baja, confirmando entonces la estrecha relación que tienen dichas variables sobre la opacidad. No obstante, es importante resaltar que, como se ve en la zona central de la figura, existe una región predominantemente marcada por la presencia del rango de opacidad baja en una zona donde actúa principalmente el inyector de 18 MPa a velocidad baja. En teoría debería esperarse que, a menor presión de inyección, sea mayor la opacidad, por lo que según la información que puede extraerse de la visualización en cluster, es posible afirmar que el efecto que genera la velocidad sobre la opacidad, predomina ante el generado por la presión de inyección.

**Figura 27.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de opacidad. (Z, X)



La *región 1* de la **Figura 28** aporta una información adicional, sobre la zona alargada existe una presencia predominante de puntos de operación con baja opacidad, dicha zona coincide con puntos de operación a carga baja y velocidad baja con presión de inyección de 22 MPa.

**Figura 28.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de opacidad. (Z, -X)



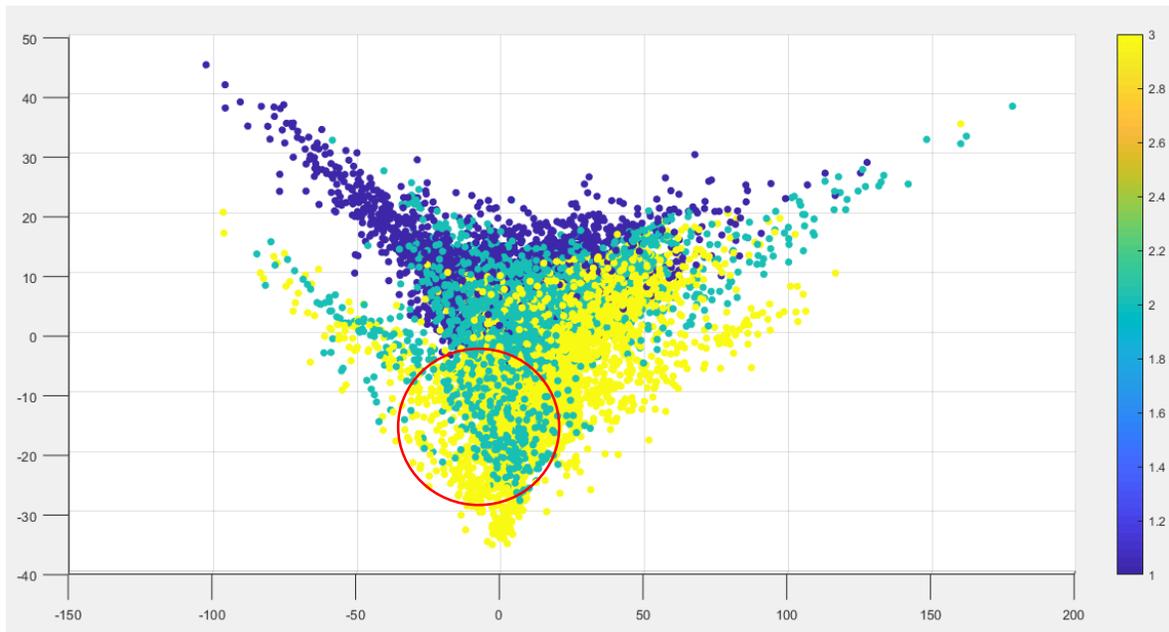
La *zona 1* es una región en donde existe presencia de todos los inyectores como puede verse en la **Figura 19** con predominancia de los inyectores de 18 MPa y 20 MPa, en lo que respecta

a la etiqueta de opacidad, se presenta una fuerte mezcla de puntos pertenecientes a todos los rangos y en el que predomina el rango de opacidad alta. Como se muestra en la **Figura 13** esta misma zona coincide con una región en donde existe una concentración considerable de puntos de operación a velocidad baja, lo cual es extraño siendo que anteriormente se afirmó que la velocidad estaba fuertemente relacionada con la opacidad. Al verificar la **Figura 24** se evidencia que esta misma zona coincide con una región en la que los puntos de operación con carga alta se concentran fuertemente, esto explica la presencia principalmente de puntos de opacidad alta en la *zona 1*. Es posible entonces afirmar que, aunque la velocidad esté correlacionada con la opacidad, esta se encuentra igualmente relacionada con la carga por lo que la presencia de puntos de operación con carga media y alta genera regiones de concentración de puntos de operación con opacidad media y alta.

Lo que puede observarse de la *región 2* de la **Figura 28** refuerza esta afirmación, ya que es evidente la presencia de puntos de los rangos de opacidad media y alta agrupados desde el centro y hacia lados opuestos en una zona en donde existe una presencia exclusiva de puntos de operación a velocidad baja, pero, como lo muestra la **Figura 24**, esta región coincide con una zona en la que los puntos de operación a carga media y alta tienen un comportamiento idéntico al de la presente figura.

La **Figura 29** arroja algunas respuestas adicionales, se ha dicho que tanto la velocidad como la carga son variables que presentan una fuerte relación con el comportamiento de los datos de opacidad registrados.

**Figura 29.** PCA momentos estadísticos con etiqueta de opacidad. (Z, Y)



Del análisis de la **Figura 28** se observó que en algunas zonas, una presencia de puntos de operación con carga alta fue suficiente para generar concentraciones de opacidad alta, aun cuando dicha zona, coincidió con una región de velocidad baja. De igual modo, la región 1 muestra una zona en la que existe una fuerte presencia de puntos de operación con carga baja como puede constatarse en la **Figura 25**. Mientras que en la **Figura 15** se evidencia cómo dicha región coincide con una zona en donde la presencia de puntos de operación con etiqueta de velocidad alta y media es predominante. Es evidente entonces que, un valor de velocidad alta o carga alta propicia valores altos de opacidad.

En general, aunque existen zonas en las que puede observarse que la opacidad sigue la tendencia esperada según la presión del inyector, se encuentra que en las zonas donde esto sucede, la tendencia esperada según la carga y la velocidad son las mismas, mientras que existen regiones en las que la tendencia que sigue la opacidad se ve estrechamente relacionada con la velocidad de giro y el régimen de carga.

## CAPÍTULO V

### 5. GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS

#### 5.1. ALMACENAMIENTO DE DATOS

Finalmente, para hacer entrega de toda la información usada en este proyecto de una manera ordenada y de fácil acceso, se almacena toda la información en la carpeta **Base de datos PG2018**, en donde inicialmente se listan según su extensión y/o naturaleza.

Se creó entonces una carpeta para los datos adquiridos llamada **DATOS ADQ** en donde se puede apreciar claramente los valores ordenados según su nombre ruta, este se compone por los siguientes elementos y mencionados en el orden que se muestra a continuación: ***RPM\_CARGA\_PRESIÓNDEINYECTOR\_#TRATAMIENTO\_#PRUEBA***. Otra carpeta que lleva el nombre de **FIGURAS PCA** contiene los archivos *.fig* que dan acceso a los gráficos revisados en el capítulo anterior, y los hay de dos tipos, uno que contiene los gráficos según una matriz de características que contiene los datos del espectrograma y siete momentos estadísticos de dos sensores. Y otros que guardan figuras según otra matriz de características que contiene los siete momentos estadísticos para tiempo y frecuencia de todos los sensores. Existe otra carpeta que lleva el nombre de **MATRICES** y se divide en datos procesados y etiquetas, en esta última carpeta se separan en etiquetas dobles y sencillas. Por último, una carpeta llamada **FUNCIONES** agrupa todos los programas de MatLab que fueron necesarios para la realización del proyecto con su respectivo nombre.

Por último en la carpeta llamada **Tablas Excel**, se pueden encontrar dos archivos los cuales contienen todos los cálculos necesarios para la carga y el valor de potencia, y también el diseño del experimento y los valores de opacidad adquiridos durante todas las pruebas.

## CONCLUSIONES

- ✓ Producto de una revisión bibliográfica, en la que se identifican diferentes trabajos e investigaciones, fue posible realizar un protocolo para el experimento desarrollado en el presente trabajo, teniendo en cuenta la importancia de la correcta ubicación de los sensores especializados para medir vibraciones, emisiones de gases y señales acústicas. De esta manera, con el valioso acompañamiento de profesionales afines, y realizando un correcto procedimiento, se hace posible la estructuración y conducción de un experimento que aportó una base de datos robusta y confiable.
- ✓ Uno de las formas de reducir el error en un experimento, es garantizando aleatoriedad a la hora de realizar las pruebas. Esto no fue completamente posible ya que no existía manera rápida de modificar la presión de inyección, por esto se decidió hacer los tratamientos aleatorios para cada inyector.
- ✓ El manual del opacímetro sugiere, para la realización de las pruebas, que el motor sea acelerado al máximo y mantenido así durante cuatro segundos antes de llevarlo nuevamente a ralentí. Este procedimiento no se pudo seguir ya que el experimento se realizó para tres valores de velocidad diferentes las cuales eran constantes durante las pruebas.
- ✓ En este trabajo de grado se comprueba las ventajas del análisis de componentes principales para el procesamiento de la información recopilada, permitiendo observar la relación inherente entre las variables de interés.
- ✓ La información adquirida mediante el sensor acústico no es precisa debido al hecho de que el instrumento empleado no fue un sonómetro profesional sino un micrófono, además, las instalaciones no permitían la adquisición de señales libres de ruido, ya que el recinto se encontraba abarrotado de objetos que reflejaban hacia el micrófono las ondas sonoras emitidas por el motor, además, en el interior del laboratorio permanentemente había personal supervisando la prueba.
- ✓ En el cálculo de la potencia es posible incurrir en errores de hasta el 12% debido a que esta operación involucra la velocidad de giro, factor que no fue medido correctamente debido a un mal funcionamiento del sensor de régimen de giro durante

las pruebas, y que después de un procesamiento de la señal, arrojó valores inconsistentes que no pudieron ser tenidos en cuenta. Para no incurrir en este error, se pueden analizar los valores de momentos calculados con la celda de carga.

- ✓ Por medio del análisis de las gráficas de PCA para opacidad, se evidenció como esta variable se encuentra fuertemente relacionada con la velocidad de giro y la carga, mientras que la presión de inyección no tiene un efecto importante en tanto que, independiente de esta presión, los efectos de la velocidad y la carga son predominantes.
- ✓ El papel que desempeñan los programas computacionales en el análisis de múltiples variables es de suma importancia en tanto que, permite la adquisición y procesamiento de millones de valores en periodos cortos de tiempo, con alta precisión y confiabilidad, confirmando la importancia de continuar investigando y desarrollando herramientas que faciliten el diagnóstico de los motores de combustión interna y en general, de toda máquina involucrada en procesos industriales que generen un aporte importante en las emisiones de gases de tipo invernadero, con el fin último de reducir su impacto y contribuir con la transición necesaria para cumplir con el acuerdo de París.

## **APORTES**

- ✓ Para la generación de una base de datos de fácil acceso que pueda ser utilizada en estudios posteriores, se creó una carpeta que contiene toda la información recopilada, allí se ordenaron todos los archivos según su extensión y/o naturaleza como se describe detalladamente en el **Capítulo V**.
- ✓ Como aporte y con el fin de corroborar la presión de operación de los inyectores, se hizo posible la realización de un experimento en un banco de pruebas en donde se leyó la caída de potencial generada por el paso de la corriente proveniente del transductor alimentado a 24 V a través de una resistencia por medio del software computacional LabView. Esta medida representa el valor de la presión a la que libera el combustible, valor al que se llega interpolando entre los valores de una prueba de

calibración que se realizó con un manómetro de tubo Bourdon, comprobando que los valores de la presión registrados corresponden con los suministrados por el personal de calibración.

## **RECOMENDACIONES**

- ✓ Para la correcta adquisición de señales acústicas es necesario contar con un sonómetro profesional que permita capturar señales con alta calidad, además se precisa de una cámara anecoica ya que el diseño de sus paredes evita la reflexión de las ondas de sonido y además garantiza un aislamiento acústico lo que permite la recolección de señales limpias, libres de ruido.
- ✓ Para operar un opacímetro de este tipo, bajo estas condiciones, debe tenerse en cuenta que en ocasiones el equipo muestra una advertencia de presión baja durante algunas pruebas, cuando esto suceda es necesario obstruir el ducto de escape del opacímetro durante un periodo de tiempo muy corto para que este pueda realizar la medición.

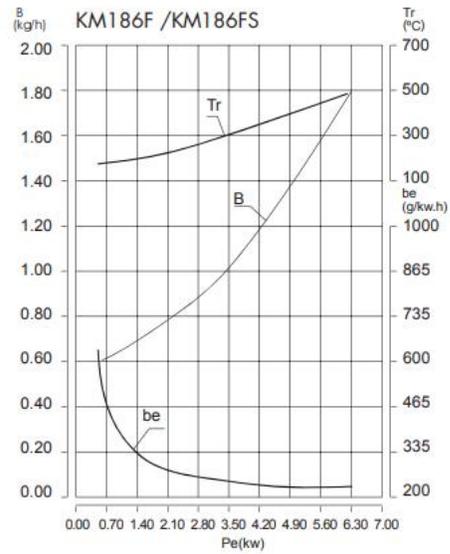
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, M. del M. Viana, J. C. Kindelán, L. Pérez, J. Sunyer, and N. Künzli, *Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado*. Barcelona, España, 2006.
- [2] Z. Acosta, “Archivos de economía: Regulación de los servicios de transporte en Colombia y comercio internacional,” 2004.
- [3] G. Duque Escobar, *Introducción a la economía del transporte*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2006.
- [4] ISO 13372, *Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary*. 2012.
- [5] A. D. Pulido, J. D. Turriago, R. Jiménez, C. F. Torres, A. Rojas, N. Chaparro, E. Y. Ortiz, S. Granados, J. Rodríguez, V. Berrío, I. C. Figueroa, Á. V. Bohórquez, S. Rojas, and J. A. López, *INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES EFECTO INVERNADERO*. PUNTOAPARTE BOOKVERTISING, 2016.
- [6] H. Gutiérrez Pulido and R. De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Segunda ed. Mc Graw Hill, 2008.
- [7] E. Y. Kim, A. C. C. Tan, and B. Yang, “Acoustic Emission for Diesel Engine Monitoring : A Review and Preliminary Analysis Diesel engines Acoustic emission,” pp. 489–499, 2011.
- [8] S. Delvecchio, P. Bonfiglio, and F. Pompoli, “Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines : A critical review of existing techniques,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 99, pp. 661–683, 2018.
- [9] A. P. Carlucci, F. F. Chiara, and D. Laforgia, “Analysis of the relation between injection parameter variation and block vibration of an internal combustion diesel engine,” *J. Sound Vib.*, vol. 295, no. 1–2, pp. 141–164, Aug. 2006.
- [10] E. May, *Mecánica para Motores Diesel Teoría, Mantenimiento y Reparación*, Primera ed. Mc Graw Hill, 1988.
- [11] A. Taghizadeh-alisarai, B. Ghobadian, and T. Tavakoli-hashjin, “Analysis and evaluation of vibrations of power tiller in the stationary condition,” *Iran. J. Biosyst. engineering*, vol. 41, pp. 27–35, 2010.
- [12] A. Taghizadeh-alisarai, B. Ghobadian, T. Tavakoli-hashjin, and S. Saeid, “Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel fuel blends,” *Fuel*, vol. 102, no. 2012, pp. 414–422, 2013.
- [13] D. P. Satsangi and N. Tiwari, “Experimental investigation on combustion , noise , vibrations , performance and emissions characteristics of diesel / n-butanol blends driven genset engine,” *Fuel*, vol. 221, no. September 2017, pp. 44–60, 2018.
- [14] C. M. Harris, *Manual de medidas acusticas y control de ruido*, Tercera ed. Mc Graw Hill, 1995.
- [15] J. D. Ramírez Alzate and A. Arcila Agudelo, “VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN PARA VARIOS COMBUSTIBLES A UTILIZAR EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2017.
- [16] T. Murphy and A. Lau, “Manejo de valores atípicos,” *ASTM standardization news*, 2008.
- [17] D. Johnson, *Metodos Multivariados Aplicados*. Thomson Editores Mexico, 2000.

## ANEXOS

### ANEXO A: Motor 186F.

Para la implementación de las pruebas se utiliza un motor CHANGFA 186 F, este motor es monocilíndrico vertical, refrigerado por aire forzado, y de inyección directa; adicionalmente, puede verse en obras civiles, generación de energía eléctrica y en labores agrícolas.



**Información de catálogo del motor 186 F.**

<b>Motor CHANGFA186 F</b>	
Tipo	motor vertical mono cilíndrico- 4 tiempos
Combustible	Diesel
Refrigeración	Aire forzado
Sistema de alimentación	inyección directa
Diámetro (mm) x Carrera (mm)	86x70
Longitud de biela (mm)	118
Cilindraje (cm <sup>3</sup> )	406
Relación de compresión	19:01
Lubricación	Salpicadura
Arranque	eléctrico (12V-36A)/manual (Yoyo)
peso (kg)	48
dimensiones LxWxH (mm)	417x470x494
Dirección de giro	Anti horario (visto desde la salida de potencia)
Velocidad normal de giro (rpm)	3600
Capacidad combustible (L)	5,5
lubricante/cantidad (L)	SAE 10W30/ 1,65
Potencia normal (kW)	5,66/6,3
Velocidad media de pistón (m/s)	7/8,4
Presión media efectiva (kPa)	561,6/543,5
Consumo de combustible (g/kW)	273,5/285,7
Holgura de válvulas (admisión/escape) (mm)	0,15/0,15
Apertura válvula de admisión	13° antes de punto muerto superior
Cierre válvula de admisión	52° después de punto muerto inferior
Apertura válvula de escape	57° antes de punto muerto inferior
Cierre válvula de escape	30° después de punto muerto superior
Ángulo de inyección de combustible	20° antes de punto muerto superior
Temperatura del escape (°C)	480
Temperatura de aceite de lubricación (°C)	95
Presión de inyección de combustible (MPa)	19,6
Longitud de eje de salida (mm)	70

## ANEXO B: Opacímetro

Al momento de analizar los gases del motor, se hace uso de un opacímetro *Lucas Smokemeter MK4 – YDA302* para medir la transparencia de las emisiones provenientes del exosto; el dispositivo mide la fracción de luz transmitida por un volumen de humo del escape. Este equipo alimentado eléctricamente mediante una fuente de 23 V CA, situada en el carrito y la cual debe ser conectada mediante manguitos de goma instalando el cable rojo al positivo y el negro al negativo. Además, en la entrada de gases del dispositivo se utiliza un tubo flexible de 3 metros, este es conectado a una sonda de 10 mm de diámetro que es instalada en el tubo de escape en la zona donde inicia el ducto de extracción como se puede ver en la ilustración.

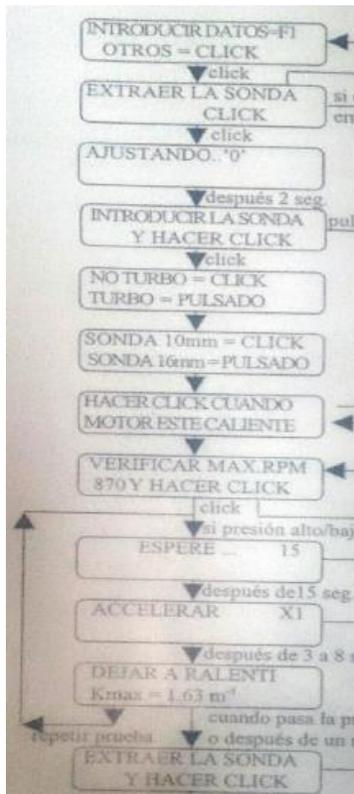
### Imágenes sonda, opacímetro MK4-YDA302 e instalación del equipo.



Para la realización de la prueba primero se debe encender el equipo y esperar 4 minutos de calentamiento, durante este periodo la sonda no debe estar dentro del tubo de escape. Al momento que aparece el mensaje **EXTRAER LA SONDA/CLICK**, se realiza el ajuste del cero para la medición de humo, este dato es salvado en la hoja de cálculo como valor de offset. La sonda es ubicada en el exosto cuando se observa **INTRODUCIR LA SONDA/Y HACER CLICK** lo cual indica una realización satisfactoria del cero. En esta etapa se debe hacer click para iniciar una prueba de secuencia nominal. Se ejecuta click directamente con los anuncios **TURBO=CLICK** y en el siguiente **SONDA 10mm = CLICK**. Observando que el equipo anuncia **HACER CLICK CUANDO EL MOTOR ESTE CALIENTE** se enciende el motor y se espera un instante para pasar al siguiente aviso el cual menciona **VERIFICAR RPM**, en esta fase es donde se efectúan las modificaciones de carga y velocidad que requiere el tratamiento a evaluar después se hace click. El bucle de prueba se inicia en esta ocasión el cual consta de 15 segundos de espera y 5 segundos de toma de

muestras, este se repite 4 veces. Se muestra el cuadro de flujo descrito. Por último, al identificar el mensaje **EXTRAER LA SONDA/Y HACER CLICK** se deja pulsado el mando para ver el valor de las 4 medidas y el promedio en pantalla y poder ser registrados en la hoja de cálculo.

### Cuadro de flujo de pruebas con el opacímetro.



### ANEXO C: Especificaciones del sistema de carga

La carga del motor se modifica usando un dinamómetro de “Corrientes de Eddy” marca *land & sea*. Su principio de funcionamiento es un mecanismo de freno que utiliza la inducción electromagnética para crear el fenómeno conocido como corriente de Foucault, creando una serie de resistencias, aprovechadas para frenar el motor. Con referencia a lo anterior se muestra una descripción del dinamómetro usado en las pruebas.

#### Dinamómetro CFK-200.



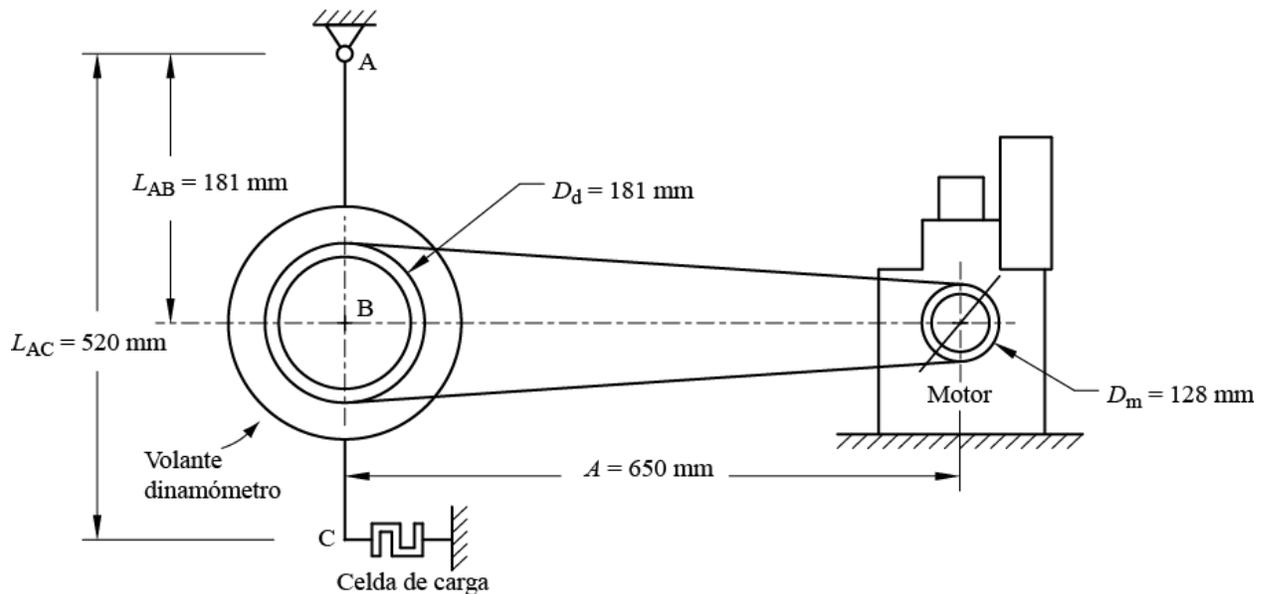
#### Descripción del dinamómetro.

Rango de aplicación (GVW)		<b>15 - 18</b>
Máximo torque de freno	12 V	<b>1650 Nm</b>
	24 V	<b>2000 Nm</b>
Masa	Completo	<b>232 Kg</b>
	Estator	<b>154 Kg</b>
	Rotor	<b>78 Kg</b>
Inercia del rotor		<b>2,69 Kgm<sup>2</sup></b>
Torque máximo transmisible		<b>31600 Nm</b>
Velocidad máxima de giro		<b>3600 R.P.M.</b>
Espacio para regulación de aire		<b>1,4 mm</b>

#### Valores de corriente eléctrica para cada nivel de carga

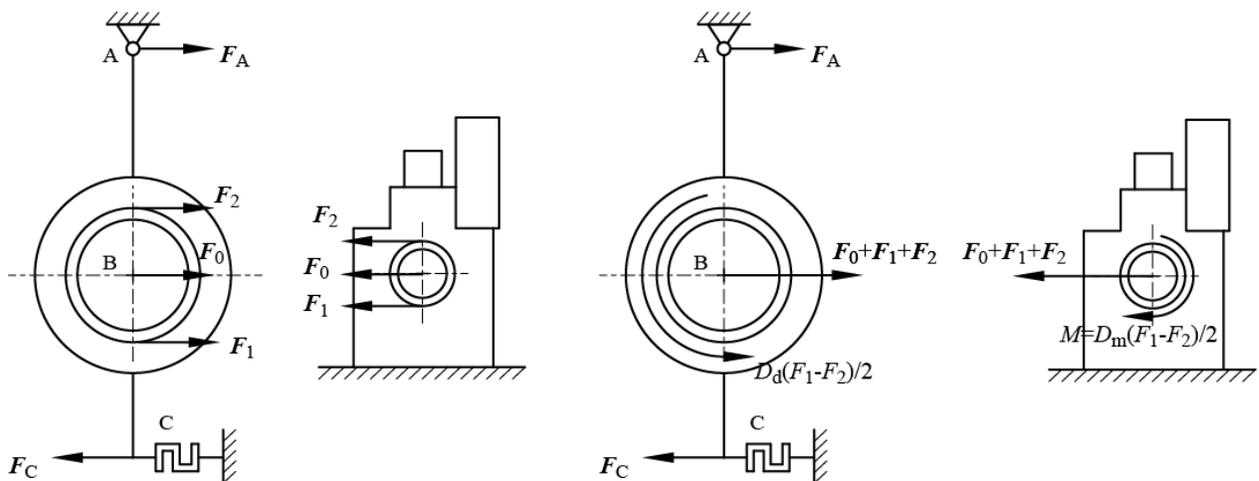
Carga	Corriente eléctrica [A]
Baja	0,5
Media	1
Alta	1,5

### Esquema del montaje motor-dinamómetro.



Con el fin de poder calcular la potencia entregada por el motor es necesario realizar un diagrama de cuerpo libre como se enseña. Donde  $F_1$  es la fuerza realizada por el ramal tenso de la transmisión por correas y  $F_2$  del ramal flojo;  $F_A$  es la reacción en el pivote del dinamómetro,  $F_0$  es la tensión inicial de las correas esta es obtenida por medio de la celda de carga, y se mide con el fin de ajustar un cero, cabe aclarar que se hace con el motor apagado,  $F_C$  es la fuerza medida por la celda de carga durante las pruebas.  $M$  es el valor del momento en el eje de salida del motor.

### Diagrama de cuerpo libre del sistema de transmisión de potencia.



Posterior al análisis del diagrama de cuerpo libre se puede encontrar la relación matemática usada para calcular el par en el eje del motor.

$$M = \frac{(L_{AC}F_C - L_{AC}F_0)}{L_{AB} \left(\frac{R+1}{R}\right) + \frac{D_d}{2} \left(\frac{R-1}{R}\right)} * \frac{D_m}{2} \left(\frac{R-1}{R}\right)$$

Dónde: M momento entregado por el motor,  $L_{AC}$  distancia entre el pivote del dinamómetro y la celda de carga,  $L_{AB}$  distancia entre el pivote del dinamómetro y el centro de la polea de este,  $D_d$  diámetro de polea del dinamómetro,  $D_m$  diámetro de polea del motor ( $D_m < D_d$ ) y R es la relación de fuerzas entre ramal tenso y ramal flojo de la transmisión por correa.

Se ilustra la celda de carga instalada en el banco de prueba y cuyo principio de operación es la deformación de galgas extensométricas. Además, se exhibe las características de la celda de carga.

#### Celda de carga instalada.



#### Datos técnicos celda de carga.

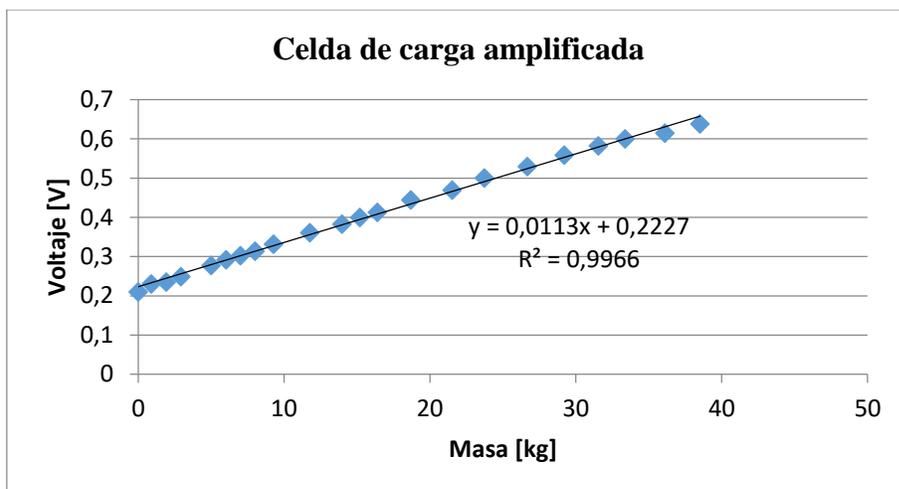
Datos celda de carga	
Capacidad [lb]	750
Voltaje de excitación [V]	5-15
Sensibilidad [mV/V]	3 ± 0,3
Material	acero inox
Límite de sobrecarga	120%
Límite de ruptura	200%
Temperatura de operación [°C]	-15 a 70
Impedancia de entrada [ohm]	> 385
Impedancia de salida [ohm]	350 ± 3
Protección	IP65

Sabiendo que el valor entregado por la celda de carga es una medida de voltaje, y para que este sea útil es necesario poder transformar la medida tomada en un dato que corresponda a una medida de peso. Se realizó la calibración para verificar la sensibilidad de celda de carga, suspendiéndola por uno de sus extremos a una estructura y adicionando masas por el otro; se utilizó una báscula para medir cada masa, la celda de carga se alimentó con 10V DC, y el

voltaje de salida de la celda se midió con un multímetro para cada masa adicionada. Se muestran los valores de masa probados y los voltajes de salida obtenidos. Luego, se graficó la recta de la celda de carga como se muestra y cuya ecuación es presentada, adicionalmente el valor  $R^2$  de 0,9966 indica que los datos consignados guardan una relación lineal entre sí y se puede extrapolar para obtener los valores de voltaje de salida cuando la masa cargada sea aún mayor a las ensayadas.

### **Masas y resultados calibración de la celda de carga**

Masa [g]	Voltaje [v]
0	0,2103
893	0,2301
1919,1	0,2349
2924,7	0,249
4994	0,2771
6014,3	0,292
7006,9	0,3027
8010,2	0,3143
9272,3	0,3318
11766,5	0,3613
13975,7	0,3832
15191,3	0,4001
16400,2	0,4125
18689,8	0,4445
21529,9	0,4699
23718,7	0,5005
26683,1	0,53001
29201,7	0,55901
31547,3	0,5827
33375,9	0,6002
36113,2	0,615
38516	0,6386

**Gráfico de caracterización celda de carga.**

## ANEXO D: Acelerómetros

En el presente experimento se usaron tres acelerómetros de alta precisión con el fin de medir las vibraciones a lo largo de los tres ejes principales. En la ilustración es posible ver uno de los dispositivos utilizados para dichas tomas. Otra información relacionada con los acelerómetros puede ser revisada en los anexos de este documento. Como se muestra más adelante estos sensores de vibración son ubicados en el bloque y la culata del motor, y estas posiciones permanecen constantes durante la realización de las pruebas. Finalmente, estos sensores son conectados a la tarjeta de adquisición de datos.

### Acelerómetro AC102.



### Datasheet acelerómetros:

CTC. “Accelerometers AC102 Series”. Recurso disponible en línea: [https://www.ctconline.com/fileup/3DNEWPDF/AC102series\\_datasheet\\_3D.pdf](https://www.ctconline.com/fileup/3DNEWPDF/AC102series_datasheet_3D.pdf)

Información técnica:

Specifications	Standard	Metric
Part Number	AC102	M/AC102
Sensitivity ( $\pm 10\%$ )	100 mV/g	
Frequency Response ( $\pm 3\text{dB}$ )	30-900,000 CPM	0,5-15000 Hz
Frequency Response ( $\pm 10\%$ )	120-600,000 CPM	2,0-10000 Hz
Dynamic Range	$\pm 50$ g, peak	
<b>Electrical</b>		
Settling Time	<2.5 seconds	
Voltage Source	18-30 VDC	
Constant Current Excitation	2-10 mA	
Spectral Noise @ 10 Hz	14 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	
Spectral Noise @ 100 Hz	2.3 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	
Spectral Noise @ 1000 Hz	2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	
Output Impedance	<100 ohm	
Bias Output Voltage	10-14 VDC	
Case Isolation	$>10^8$ ohm	

## ANEXO E: Señal acústica

Para adquirir las señales acústicas provenientes del motor, se emplea un micrófono con referencia SF-666, el cual es conectado directamente a la entrada de la torre del computador utilizado. Posteriormente, en el panel de control del PC y seleccionando dispositivos de grabación, seleccionando propiedades en el nivel de la entrada del micrófono es puesta al máximo y la amplificación se coloca en cero decibeles.

### Micrófono SF-666.



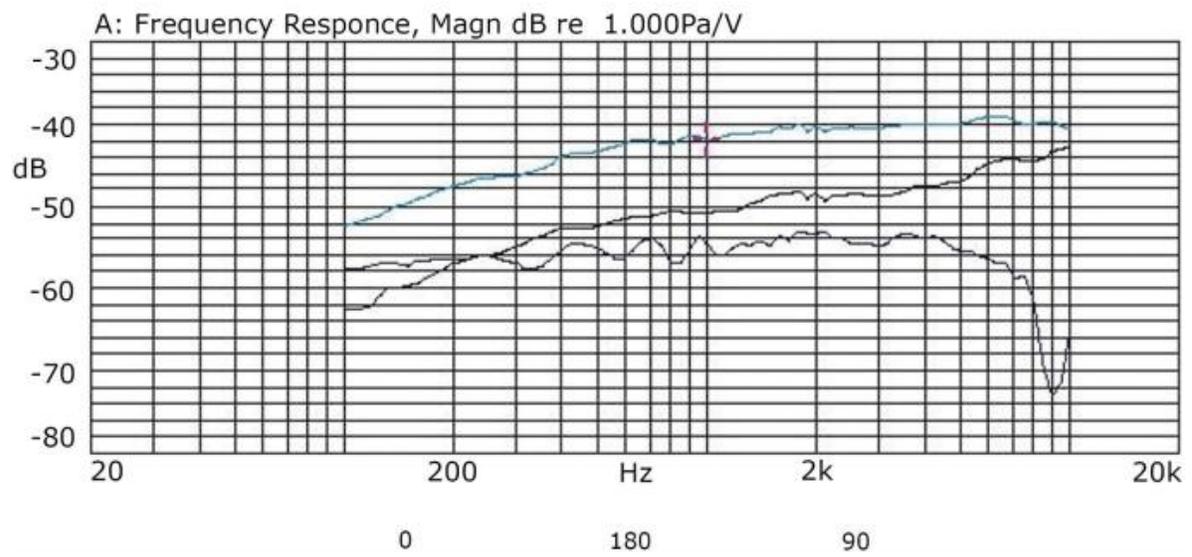
#### Datasheet micrófono:

ZAX SOUND. "User manual Professional Condenser Microphone SF-666". Recurso disponible en línea: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/B1QW5kPn3fS.pdf>

Datos técnicos:

NO	Parameter	Symbol	Condition	Limits			Unit
				Min.	Center	Max.	
1	Sensitivity	S	f= 1Khz, S.P.L= 1Pa, 0dB= 1V/Pa	-41	-38	-35	dB
2	Output impedance	ZOUT	f= 1Khz			680	$\Omega$
3	Current Consumption	IDDS	Vcc=1.5V , RL=680 $\Omega$	150		450	$\mu$ A
4	Signal to Noise Ratio	S/N	f= 1 Khz , S.P.L= 1Pa	60			dB
5	Decreasing Voltage	S-VS	Vcc= 4.5V to 1.0V			-3	dB
6	Operating Voltage			1		10	V
7	Maximum input S.P.L					110	dB
8	Frequency			100		16k	Hz

Respuesta a diferentes frecuencias:



## **ANEXO F: Régimen de giro**

Después de lo anterior expuesto, se puede decir entonces que es la velocidad del motor un parámetro que debe considerarse, además de que se hace indispensable el permanecer la velocidad de giro del motor constante durante cada prueba, para tal fin se hace uso de la palanca de control de velocidad instalada en la maquina; este recurso era bloqueado al llegar a un valor de velocidad medido como se describe a continuación. Ya que el motor al que se le realizan las pruebas fue también previamente adaptado a gasolina para realizar diversos ensayos dentro de la universidad; esta máquina cuenta con una bobina pulsora, la cual genera un alto por cada vuelta del cigüeñal, esta palpitación es tomada y conectada a la unidad de control del motor (ECU) que muestra la imagen, la cual mediante la frecuencia del pulso calcula el régimen de giro, esta información es mostrada en el computador mediante el uso de un software.

### **Perilla de control de velocidad.**



### **Unidad de control del motor.**



## ANEXO G: Módulo de adquisición de datos

A la hora de adquirir las señales provenientes de la celda de carga y los acelerómetros, se hizo necesario tener una tarjeta para esa disposición. En este experimento fue usada una tarjeta de adquisición National Instruments cDAQ-9178.

### Tarjeta de adquisición NI cDAQ-9178.



National Instruments. “Specifications NI Cdaq-9178”. Recurso disponible en línea: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374046a.pdf>

Especificaciones técnicas:

**Table 2.** DC Input Characteristics

Voltage	Minimum	Maximum
Positive going threshold	1.43 V	2.28 V
Negative going threshold	0.86 V	1.53 V
Hysteresis	0.48 V	0.87 V

**Table 3.** DC Output Characteristics

Voltage	Conditions	Minimum	Maximum
High	-	-	5.25 V
	Sourcing 100 $\mu$ A	4.65 V	-
	Sourcing 2 mA	3.60 V	-
	Sourcing 3.5 mA	3.44 V	-
Low	Sinking 100 $\mu$ A	-	0.10 V
	Sinking 2 mA	-	0.64 V
	Sinking 3.5 mA	-	0.80 V

## ANEXO H: Especificaciones inyectores

Es cuando se desea controlar un factor considerablemente contribuyente al estado del motor que se elige el hecho de variar la presión de inyección. Los inyectores deben trabajar de la forma correcta para lograr un buen funcionamiento de la máquina. La tobera tiene la función particular de inyectar el combustible finamente atomizado en la cámara de combustión. Se calibran y caracterizan tres inyectores a presiones distintas (18, 20, 22 MPa).

### Inyector de 20 MPa marcado.

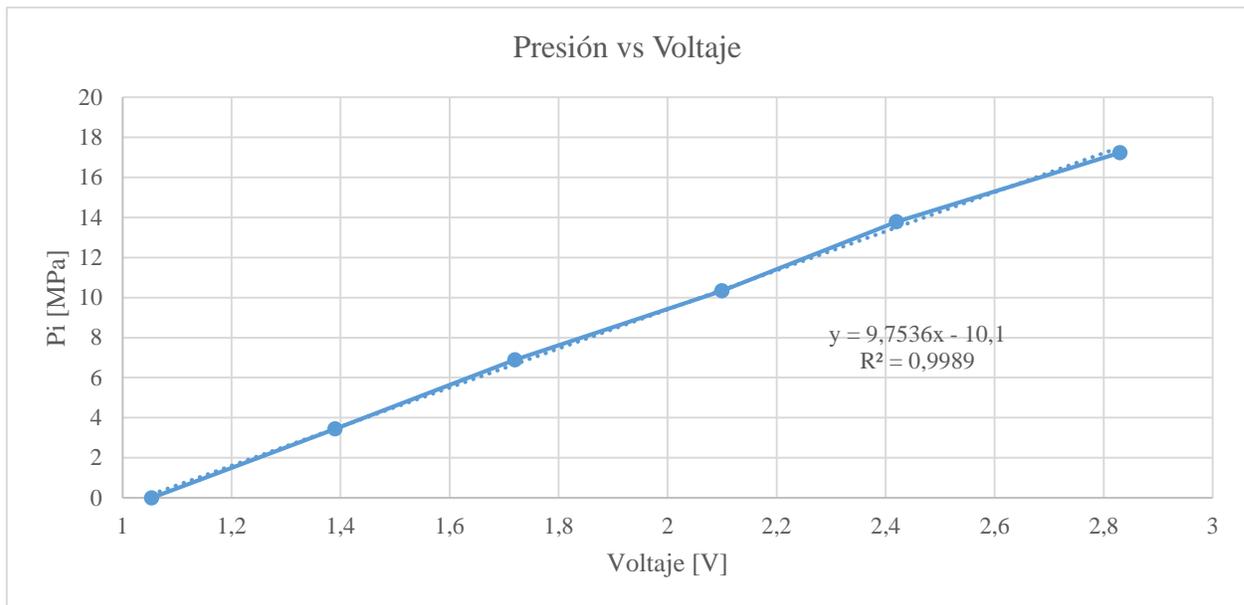


Para caracterizar los inyectores se realiza un experimento, que consiste en un Transductor LP664 para medir el valor de apertura de la tobera, y una bureta calibrada en  $\text{cm}^3$  para determinar el volumen de cada inyección. El sensor es alimentado con 24 V, y suministra una señal de corriente proporcional a la compresión, este transductor previamente se calibra con un cilindro hidráulico y un manómetro análogo, y midiendo la caída de tensión en una resistencia de  $250 \Omega$ ; al graficar estos datos se nota una respuesta lineal con 99,89 % de correlación y del cual se calcula la recta para determinar la presión de este trabajo. Sin embargo, a cada inyector se le realizan 10 pruebas para determinar sus características.

### Sensor de presión

Presión [PSI]	Voltaje [V]	Presión [MPa]
0	1,0533	0
500	1,39	3,446428571
1000	1,72	6,892857143
1500	2,1	10,33928571
2000	2,42	13,78571429
2500	2,83	17,23214286

## Respuesta de presión



### Caracterización inyectores

Inyector	Prueba	Voltaje [V]	Presión [MPa]
180	1	2,920059	18,38108746
	2	2,924588	18,42526152
	3	2,917471	18,35584515
	4	2,918765	18,3684663
	5	2,919736	18,37793705
	6	2,915207	18,333763
	7	2,919412	18,37477688
	8	2,915207	18,333763
	9	2,916824	18,34953457
	10	2,91456	18,32745242
200	1	3,091835	20,05652186
	2	3,092806	20,0659926
	3	3,080837	19,94925176
	4	3,081807	19,95871276
	5	3,08116	19,95240218
	6	3,084072	19,98080466
	7	3,088277	20,02181855
	8	3,083101	19,97133391
	9	3,087307	20,01235756
	10	3,08763	20,01550797
220	1	3,285286	21,94336553
	2	3,288521	21,97491843
	3	3,286904	21,95914685
	4	3,290462	21,99385016
	5	3,29402	22,02855347
	6	3,296932	22,05695596
	7	3,29402	22,02855347
	8	3,291433	22,00332091
	9	3,291756	22,00647132
	10	3,286904	21,95914685