

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DIAGNÓSTICO DE FALLAS OCASIONADAS POR VARIACIÓN DE
VOLUMEN DE COMBUSTIBLE EN LOS INYECTORES DE UN
MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO A DIÉSEL
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS.**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGISTER EN SISTEMAS
AUTOMOTRICES**

JOSÉ FERNANDO MOLINA NARVÁEZ

josefernando_2000@yahoo.com

JUAN PABLO MONTERO SALGADO

jpmonteroec@hotmail.com

DIRECTOR: ING. IVÁN ZAMBRANO OREJUELA MSc.

ivan.zambrano@epn.edu.ec

QUITO, SEPTIEMBRE 2015

DECLARACIÓN

Nosotros, José Fernando Molina Narváez y Juan Pablo Montero Salgado, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

José Fernando Molina Narváez

Juan Pablo Montero Salgado

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Fernando Molina Narváez y Juan Pablo Montero Salgado, bajo mi supervisión.

Ing. Iván Zambrano Orejuela MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Los autores de este proyecto presentan su más sincero agradecimiento a los educadores y autoridades de la Escuela Politécnica Nacional, que en el transcurso de esta etapa de formación nos han inculcado tanto conocimientos técnicos como valores morales para lograr superar los distintos obstáculos que se presentan en la vida profesional.

Además agradecemos al padre Javier Herrán Gómez Rector de la Universidad Politécnica Salesiana por el apoyo brindado.

Especialmente agradecemos a nuestro director de proyecto el Ing. Iván Zambrano Orejuela, quién nos apoyó e incentivo a lo largo de la elaboración de este proyecto investigativo, llegando así a culminar con éxito el mismo, así como también a la Unidad de Postgrados de Ingeniería Mecánica por su organización y seriedad para con el normal desenvolvimiento de la maestría.

Deseamos agradecer al Ing. Cristian García codirector de este proyecto y a la Doctora Mary Vergara quienes nos brindaron sus conocimientos y apoyo incondicional sobre el desarrollo de este proyecto.

Agradecemos a los Ingenieros Fernando Chica, Néstor Rivera, Wilmer Contreras, Jorge Fajardo, Pablo Campoverde y Juan Valladolid por brindarnos su apoyo y amistad durante esta etapa de formación. A todos los compañeros que compartieron esta etapa de formación y que de una u otra manera nos apoyaron incondicionalmente.

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico primeramente a Dios, por darme fortaleza e integridad para superar los obstáculos que se me han impuesto a lo largo de mi vida personal y profesional.

Dedico especialmente este proyecto a mi amiga y esposa Adriana, por ser un pilar fundamental en mi vida, y por ser quien me ha brindado su apoyo, amor y cariño durante esta etapa de formación.

A mis padres Nancy y Pablo, por haberme educado y formado con amor incondicional, llevándome a ser una persona de bien para con la sociedad.

A mis hijos, a mi hermano y amigos que me han brindado todo su apoyo y respaldo para culminar con éxito esta nueva etapa profesional.

Juan Pablo

DEDICATORIA

El presente proyecto investigativo lo dedico:

A Dios por darme la fuerza necesaria para afrontar los diferentes problemas y obstáculos en mi vida académica y profesional.

De manera muy especial dedico este proyecto investigativo a mi esposa Valery, quién ha estado siempre a mi lado, en los buenos y malos momentos, brindándome todo su amor, comprensión y apoyo incondicional, por ser el complemento de mi vida,

A mis hijos, María José, Martín Fernando y Gabriel Francisco, mis pequeños tesoros quienes son la razón de mi vida.

A mis padres Humberto y Olga, quienes me han guiado a lo largo de toda mi vida y me han inculcado valores para ser un hombre de bien, a mis hermanos por su cariño eterno, a mis suegros César y Mélida y a mis cuñados, por todo su apoyo incondicional y ser un pilar más en mi vida.

José Fernando

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE TABLAS	xxix
CAPÍTULO 1.	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN.	1
1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN.	1
1.1.2 SISTEMA DE INYECCIÓN.	1
1.1.3 COMPONENTES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL.	2
1.1.3.1 Inyectores.....	3
1.1.3.2 Sensor de presión en el riel RPS.....	7
1.1.4 TIPOS DE SISTEMAS DE INYECCIÓN.	8
1.1.4.1 Sistema Common Rail (CRS).....	8
1.1.4.1.1 Ventajas del Sistema Common Rail.....	9
1.1.4.1.2 Funcionamiento del Sistema Common Rail.	10
1.2 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE VIBRACIONES MECÁNICAS PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	12
1.2.1 DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.	12
1.2.1.1 Método de Vibraciones en el Mantenimiento Predictivo.....	13

1.2.1.2	Ventajas y desventajas del Análisis por Vibraciones aplicado al Mantenimiento Predictivo.	14
1.2.2	DIAGNÓSTICO DE AVERÍAS POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES.	15
1.2.2.1	Fundamentos.	15
1.2.2.2	Análisis de Señales.	17
CAPÍTULO 2.	19
	OBTENCIÓN DE DATOS Y TRATAMIENTO DE LOS ESPECTROS DE FUNCIONAMIENTO EN EL MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN.....	19
2.1	DEFINICIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL UTILIZANDO TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO CONTÍNUO.....	19
2.1.1	INTRODUCCIÓN.....	19
2.1.2	EL USO DEL MEJORAMIENTO CONTINUO.....	20
2.1.3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	21
2.1.4	PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO.	22
2.1.4.1	Unidad experimental.	22
2.1.4.2	Determinación de variables, factores y niveles.....	23
2.1.4.2.1	Factores a analizar.....	23
2.1.4.2.2	Descripción de los factores a analizar con sus niveles respectivos.....	25
2.1.4.2.3	Variables de respuesta	31
2.1.4.2.4	Variables controlables.....	32
2.1.4.2.5	Variables no controlables o de ruido	32
2.1.4.3	Selección del diseño experimental	32
2.1.4.4	Determinación del número de tratamientos para el experimento... ..	34

2.2	PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS...	37
2.2.1	CODIFICACIÓN DE TRATAMIENTOS.....	37
2.2.2	EQUIPOS Y ELEMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	39
2.2.2.1	Equipo Adash® A3716.....	39
2.2.2.2	Acelerómetro.....	40
2.2.3	DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	41
2.2.3.1	Norma utilizada para las pruebas experimentales.....	42
2.2.3.2	Protocolo de las pruebas experimentales.....	42
2.2.3.3	Aislamiento entre el motor CRDI marca Hyundai, modelo Santa Fe 2.0 y el piso del laboratorio.....	42
2.2.3.4	Ubicación del acelerómetro en el motor.....	43
2.2.3.5	Inyectores utilizados en la prueba experimental.....	48
2.2.3.6	Regulación del régimen de giro del motor.....	49
2.2.3.7	Sistema de control de variación de presión de combustible en el riel.	50
2.2.3.8	Adquisición de muestra acorde a la prueba experimental.....	54
2.2.3.9	Disposición general de los equipos para el desarrollo de las pruebas experimentales.....	56
2.3	TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES OBTENIDAS, POR MEDIO DE UN ALGORITMO GENERADO EN EL SOFTWARE MATEMÁTICO MATLAB®. ..	58
2.3.1	TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES.....	58
2.3.2	CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS EN EL TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES.....	61
CAPÍTULO 3.....		69
ESPECTROS CARACTERÍSTICOS DE LAS FALLAS DE FUNCIONAMIENTO POR VARIACIÓN DE VOLUMEN DE COMBUSTIBLE EN LOS INYECTORES.		69

3.1 DEFINICIÓN DE PATRONES DE VIBRACIÓN EN CONDICIONES DE OPERACIÓN NORMAL.....	69
3.1.1 ESPECTRO PATRÓN DE VIBRACIÓN A 820 RPM.....	71
3.1.2 ESPECTRO PATRÓN DE VIBRACIÓN A 1660 RPM.....	71
3.1.3 ESPECTRO PATRÓN DE VIBRACIÓN A 2500 RPM.....	72
.....	73
3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS FALLOS SIMULADOS EN EL MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN.....	76
3.2.1 FALLO EN EL MOTOR SIN VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL A 820 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%.....	76
3.2.2 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 820 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%.....	77
3.2.3 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 820 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%.....	77
3.2.4 FALLO EN EL MOTOR SIN VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%.....	77
3.2.5 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%.....	78
3.2.6 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%.....	78
3.2.7 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 100%.....	79

3.2.8 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 100%.....	79
3.2.9 FALLO EN EL MOTOR SIN VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL A 2500 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%.....	79
3.2.10 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 2500 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%.....	80
3.2.11 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 2500 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%.....	80
3.3 CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN.....	92
3.4 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	96
3.4.1 COMPARACIÓN ENTRE ESPECTROS PATRON Y ESPECTROS DE FALLA.....	96
3.4.1.1 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 820 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 0 820 1 24.....	96
3.4.1.2 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 820 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 820 2 17.....	97
3.4.1.3 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 820 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 820 2 31.....	97
3.4.1.4 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 0 1660 2 15.....	97

3.4.1.5 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 1660 1 21.....	98
3.4.1.6 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 1660 1 20.....	98
3.4.1.7 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 1660 3 23.....	99
3.4.1.8 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 1660 3 22.....	99
3.4.1.9 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 0 2500 1 25.....	100
3.4.1.10 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 2500 2 4.....	100
3.4.1.11 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 2500 2 33.....	101
3.4.2 ANÁLISIS DE LA AMPLITUD DE LAS FRECUENCIAS.....	101
3.4.2.1 Análisis de frecuencia X/2.....	113
3.4.2.2 Análisis de frecuencia X.....	117
3.4.2.3 Análisis de frecuencia 2X.....	121
3.4.2.4 Análisis de frecuencia 4X.....	125
3.4.2.5 Análisis de frecuencia 6X.....	129
3.4.2.6 Análisis de frecuencia 8X.....	133

3.4.3 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES MÁS INFLUYENTES EN LAS VARIABLES DE RESPUESTA.....	136
3.4.3.1 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la potencia.	136
3.4.3.2 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la asimetría.	136
3.4.3.3 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para curtosis.....	138
3.4.3.4 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la mediana.	138
3.4.3.5 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la moda.	139
3.4.3.6 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de RMS.	139
3.4.3.7 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el factor de cresta.....	141
3.4.3.8 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la media. ...	141
3.4.3.9 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la varianza.	142
3.4.3.10 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la desviación estándar.....	143
3.4.3.11 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor máximo.	143
3.4.3.12 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor mínimo.	143
3.4.3.13 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la potencia en intervalo de frecuencia.....	145
3.4.3.14 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la energía.	145
3.4.3.15 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.	146
3.4.3.16 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.	146
3.4.3.17 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.	148

3.4.3.18	Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.	148
3.4.3.19	Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.	149
3.4.3.20	Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.....	149
3.4.3.21	Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.....	151
3.4.3.22	Nivel de importancia de los efectos de los factores sobre las variables de respuesta.....	151
3.4.4	ANÁLISIS DE DIAGRAMAS DE EFECTOS PRINCIPALES, DE INTERACCIÓN DE FACTORES, GRÁFICAS DE SUPERFICIE Y CONTORNO	153
3.4.4.1	Análisis de diagramas de potencia.	153
3.4.4.2	Análisis de diagramas de asimetría.	157
3.4.4.3	Análisis de diagramas de curtosis.	161
3.4.4.4	Análisis de diagramas de la mediana.	165
3.4.4.5	Análisis de diagramas de la moda.	169
3.4.4.6	Análisis de diagramas del valor RMS.	173
3.4.4.7	Análisis de diagramas del factor de cresta.	177
3.4.4.8	Análisis de diagramas de la media.	181
3.4.4.9	Análisis de diagramas de la varianza.	185
3.4.4.10	Análisis de diagramas de la desviación estándar.	189
3.4.4.11	Análisis de diagramas del valor máximo.....	193
3.4.4.12	Análisis de diagramas del valor mínimo.	197
3.4.4.13	Análisis de diagramas de potencia en intervalo de frecuencia. .	201
3.4.4.14	Análisis de diagramas de Energía.	205

3.4.4.15 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.	209
3.4.4.16 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.....	213
3.4.4.17 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.	217
3.4.4.18 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.	221
3.4.4.19 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.	225
3.4.4.20 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.....	229
3.4.4.21 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.....	233
CAPÍTULO 4	238
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO.	238
4.1 CONCLUSIONES	238
4.2 RECOMENDACIONES.....	241
4.3 TRABAJOS A FUTURO.....	242
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	243
ANEXOS	246
ANEXO 1.....	247
ENCUESTAS SOBRE LAS VARIABLES MÁS INFLUYENTES EN LA VARIACIÓN DE VOLUMEN DE COMBUSTIBLE EN LOS INYECTORES EN UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA ALTERNATIVO A DIÉSEL.	247
ANEXO 2.....	257
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL ACELERÓMETRO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	257
ANEXO 3.....	259

SELECCIÓN DEL ESPECTRO PATRÓN PARA 820, 1660 Y 2500 RPM.	259
ANEXO 4.....	263
SELECCIÓN DE LOS ESPECTROS DE FALLA.....	263

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de los circuitos de baja presión y de alta presión para una bomba de elementos en línea.	3
Figura 1.2. Porta inyector e inyector.	4
Figura 1.3. Inyector.	5
Figura 1.4. Tobera de varios orificios y tobera de orificio único.	6
Figura 1.5. Toberas o inyectores de espiga.	6
Figura 1.6. Esquema del sensor de presión en el riel.	7
Figura 1.7. Sistema Common Rail.	9
Figura 1.8. Esquema de las componentes de un sistema de inyección common rail.	10
Figura 1.9. Curva P-F de un fallo.	13
Figura 1.10. Formas de presentación de la amplitud en una onda.	17
Figura 2.1. Ciclo de Deming.	20
Figura 2.2. Motor CRDI, marca Hyundai, modelo Santa Fe 2.0.	22
Figura 2.3. Diagrama de Pareto para determinar las variables influyentes.	25
Figura 2.4. Banco de pruebas de inyectores.	27
Figura 2.5. Representación geométrica del diseño de Box-Behnken.	33
Figura 2.6. Equipo Adash® A3716.	40
Figura. 2.7. Protocolo para realizar las pruebas experimentales.	44
Figura. 2.7. Protocolo para realizar las pruebas experimentales. (Continuación)	45
Figura 2.8. Bases para el aislamiento de la vibración.	46
Figura 2.9. Puntos de medición en un motor vertical en línea.	47
Figura 2.10. Ubicación del acelerómetro en el motor.	47
Figura 2.11. Inyectores utilizados en las pruebas experimentales.	48
Figura 2.12. Ubicación del pedal acelerador en el motor.	49

Figura 2.13. Visualización de rpm en escáner.	50
Figura 2.14. Circuito para la variación de presión de combustible.	51
Figura 2.15. Tarjeta ARDUINO®.	52
Figura 2.16. Programa en Simulink para el control de los voltajes.	52
Figura 2.17. Conexión en el sensor RPS para el circuito de variación de presión de combustible en el riel.	53
Figura 2.18. Funcionamiento del sistema de control de variación de presión de combustible en el riel.	54
Figura 2.19. Estabilización de los valores de las variables de salida.	55
a) Frecuencia de muestreo y tiempo de muestra	56
b) Señal de vibración en aceleración con respecto al tiempo	56
Figura 2.20. Adquisición de muestra acorde a la prueba experimental.	56
Figura 2.21. Disposición general de los equipos para el desarrollo de las pruebas experimentales.	57
Figura 2.22. Señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia (Espectro).	59
Figura 2.23. Algoritmo generado en el software Matlab® de la FFT.	59
Figura 2.24. Esquema del proceso que realiza el algoritmo generado en Matlab®.	60
Figura 2.25. Algoritmo generado en el software Matlab® de las características representativas.	61
Figura 2.26. Pantalla de caracterización de señales, espectro y filtro.	63
Figura 2.27. Pantalla de comparación de señales.	64
Figura 3.1. Gráfica de espectro patrón a 820 rpm.	73
Figura 3.2. Gráfica de espectro patrón a 1660 rpm.	74
Figura 3.3. Gráfica de espectro patrón a 2500 rpm.	75
Figura 3.4. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM 0 820 1 24	81

Figura 3.5. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM 10 820 2 17	82
Figura 3.6. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM -10 820 2 31	83
Figura 3.7. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM 0 1660 2 15	84
Figura 3.8. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM 10 1660 1 21	85
Figura 3.9. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM -10 1660 1 20	86
Figura 3.10. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM 10 1660 3 23	87
Figura 3.11. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM -10 1660 3 22	88
Figura 3.12. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM 0 2500 1 25	89
Figura 3.13. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM 10 2500 2 4	90
Figura 3.15. Gráficas de residuos de las variables de respuesta.	92
Figura 3.15. (Continuación) Gráficas de residuos de las variables de respuesta.	93
Figura 3.15. (Continuación) Gráficas de residuos de las variables de respuesta.	94
Figura 3.15. (Continuación) Gráficas de residuos de las variables de respuesta.	95
Figura 3.16. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 0 820 1 24.....	102
Figura 3.17. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 10 820 2 17.....	103
Figura 3.18. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 820 2 31	104

Figura 3.19. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 0 1660 2 15.....	105
Figura 3.20. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 10 1660 1 21.....	106
Figura 3.21. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 1660 1 20	107
Figura 3.22. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 10 1660 3 23.....	108
Figura 3.23. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 1660 3 22	109
Figura 3.24. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 0 2500 1 25.....	110
Figura 3.25. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 10 2500 2 4.....	111
Figura 3.26. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 2500 2 33	112
Figura 3.27. Amplitud de frecuencia X/2 a 820 rpm.	113
Figura 3.28. Amplitud de frecuencia X/2 a 1660 rpm.	114
Figura 3.29. Amplitud de frecuencia X/2 a 2500 rpm.	116
Figura 3.30. Amplitud de frecuencia X a 820 rpm.	117
Figura 3.31. Amplitud de frecuencia X a 1660 rpm.	118
Figura 3.32. Amplitud de frecuencia X a 2500 rpm.	120
Figura 3.33. Amplitud de frecuencia 2X a 820 rpm.	121
Figura 3.34. Amplitud de frecuencia 2X a 1660 rpm.	122
Figura 3.35. Amplitud de frecuencia 2X a 2500 rpm.	124
Figura 3.36. Amplitud de frecuencia 4X a 820 rpm.	125
Figura 3.37. Amplitud de frecuencia 4X a 1660 rpm.	126
Figura 3.38. Amplitud de frecuencia 4X a 2500 rpm.	128

Figura 3.39. Amplitud de frecuencia 6X a 820 rpm.	129
Figura 3.40. Amplitud de frecuencia 6X a 1660 rpm.	130
Figura 3.41. Amplitud de frecuencia 6X a 2500 rpm.	132
Figura 3.42. Amplitud de frecuencia 8X a 820 rpm.	133
Figura 3.43. Amplitud de frecuencia 8X a 1660 rpm.	134
Figura 3.44. Diagrama de Pareto de los efectos para la potencia.	137
Figura 3.45. Diagrama de Pareto de los efectos para la asimetría.	137
Figura 3.46. Diagrama de Pareto de los efectos para curtosis.	138
Figura 3.47. Diagrama de Pareto de los efectos para la mediana.	139
Figura 3.48. Diagrama de Pareto de los efectos para la moda.	140
Figura 3.49. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de RMS.	140
Figura 3.50. Diagrama de Pareto de los efectos para el factor de cresta.	141
Figura 3.51. Diagrama de Pareto de los efectos para la media.	142
Figura 3.52. Diagrama de Pareto de los efectos para la varianza.	142
Figura 3.53. Diagrama de Pareto de los efectos para la desviación estándar. .	143
Figura 3.54. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor máximo.	144
Figura 3.55. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor mínimo.	144
Figura 3.56. Diagrama de Pareto de los efectos para la potencia en intervalo de frecuencia.....	145
Figura 3.57. Diagrama de Pareto de los efectos para la energía.	146
Figura 3.58. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.	147
Figura 3.59. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.	147
Figura 3.60. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.	148
Figura 3.61. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.	149

Figura 3.62. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.	150
Figura 3.63. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.....	150
Figura 3.64. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.....	151
Figura 3.65. Gráfica de efectos principales para potencia.	154
Figura 3.66. Gráfica de interacción para potencia.....	154
Figura 3.67. Gráfica de superficie de Potencia [μw] vs. Inyector. Presión.....	155
Figura 3.68. Gráfica de contorno de Potencia [μw] vs. Inyector. Presión.	156
Figura 3.69. Gráfica de superficie de Potencia [μw] vs. Inyector. RPM.....	157
Figura 3.70. Gráfica de contorno de Potencia [μw] vs. Inyector. RPM.	157
Figura 3.71. Gráfica de efectos principales para la asimetría.....	158
Figura 3.72. Gráfica de interacción para la asimetría.....	158
Figura 3.73. Gráfica de superficie de Asimetría vs. Inyector. Presión.	159
Figura 3.74. Gráfica de contorno de Asimetría vs. Inyector. Presión.	160
Figura 3.75. Gráfica de superficie de Asimetría vs. Presión. RPM.....	160
Figura 3.76. Gráfica de contorno de Asimetría vs. Presión. RPM.	161
Figura 3.77. Gráfica de efectos principales para curtosis.....	162
Figura 3.78. Gráfica de interacción para curtosis.	162
Figura 3.79. Gráfica de superficie de Curtosis vs. Inyector. Presión.	163
Figura 3.80. Gráfica de contorno de Curtosis vs. Inyector. Presión.	164
Figura 3.81. Gráfica de superficie de Curtosis vs. Presión. RPM.....	164
Figura 3.82. Gráfica de contorno de Curtosis vs. Presión. RPM.	165
Figura 3.83. Gráfica de efectos principales para la mediana.	166
Figura 3.84. Gráfica de interacción para la mediana.....	166
Figura 3.85. Gráfica de superficie de la Mediana vs. Inyector. Presión.....	167

Figura 3.86. Gráfica de contorno de la Mediana vs. Inyector. Presión.	168
Figura 3.87. Gráfica de superficie de la Mediana vs. Presión. RPM.	168
Figura 3.88. Gráfica de contorno de la Mediana vs. Presión. RPM.	169
Figura 3.89. Gráfica de efectos principales para la moda.	170
Figura 3.90. Gráfica de interacción para la moda.	170
Figura 3.91. Gráfica de superficie de la Moda vs. Inyector. Presión.	171
Figura 3.92. Gráfica de contorno de la Moda vs. Inyector. Presión.	172
Figura 3.93. Gráfica de superficie de la Moda vs. Inyector. RPM.	172
Figura 3.94. Gráfica de contorno de la Moda vs. Inyector. RPM.	173
Figura 3.95. Gráfica de efectos principales para el valor RMS.	174
Figura 3.96. Gráfica de interacción para el valor RMS.	174
Figura 3.97. Gráfica de superficie del Valor RMS vs. Inyector. Presión.	175
Figura 3.98. Gráfica de contorno del Valor RMS vs. Inyector. Presión.	176
Figura 3.99. Gráfica de superficie del Valor RMS vs. Inyector. RPM.	176
Figura 3.100. Gráfica de contorno del Valor RMS vs. Inyector. RPM.	177
Figura 3.101. Gráfica de efectos principales para el factor de cresta.	178
Figura 3.102. Gráfica de interacción para el factor de cresta.	178
Figura 3.103. Gráfica de superficie del Factor de cresta vs. Inyector. Presión. .	179
Figura 3.104. Gráfica de contorno del Factor de cresta vs. Inyector. Presión. ...	180
Figura 3.105. Gráfica de superficie del Factor de cresta vs. Presión. RPM.	181
Figura 3.106. Gráfica de contorno del Factor de cresta vs. Presión. RPM.	181
Figura 3.107. Gráfica de efectos principales para la media.	182
Figura 3.108. Gráfica de interacción para la media.	182
Figura 3.109. Gráfica de superficie de la media vs. Inyector. RPM.	183
Figura 3.110. Gráfica de contorno de la media vs. Inyector. RPM.	184
Figura 3.111. Gráfica de superficie de la Media vs. Presión. RPM.	184
Figura 3.112. Gráfica de contorno de la Media vs. Presión. RPM.	185

Figura 3.113. Gráfica de efectos principales para la varianza.....	186
Figura 3.114. Gráfica de interacción para la varianza.	186
Figura 3.15. Gráfica de superficie de la Varianza vs. Inyector. Presión.	188
Figura 3.116. Gráfica de contorno de la Varianza vs. Inyector. Presión.....	188
Figura 3.117. Gráfica de superficie de la Varianza vs. Inyector. RPM.	189
Figura 3.118. Gráfica de contorno de la Varianza vs. Inyector. RPM.....	189
Figura 3.119. Gráfica de efectos principales para la desviación estándar.	190
Figura 3.120. Gráfica de interacción para la desviación estándar.....	190
Figura 3.121. Gráfica de superficie de la Desviación estándar vs. Inyector. Presión.	191
Figura 3.122. Gráfica de contorno de la Desviación estándar vs. Inyector. Presión.	192
Figura 3.123. Gráfica de superficie de la Desviación estándar vs. Inyector. RPM.	192
Figura 3.124. Gráfica de contorno de la Desviación estándar vs. Inyector. RPM.	193
Figura 3.125. Gráfica de efectos principales para el valor máximo.....	194
Figura 3.126. Gráfica de interacción para el valor máximo.	194
Figura 3.127. Gráfica de superficie del valor máximo vs. Inyector. Presión.	195
Figura 3.128. Gráfica de contorno del valor máximo vs. Inyector. Presión.	196
Figura 3.129. Gráfica de superficie del valor máximo vs. Inyector. RPM.	196
Figura 3.130. Gráfica de contorno del valor máximo vs. Inyector. RPM.....	197
Figura 3.131. Gráfica de efectos principales para el valor mínimo.....	198
Figura 3.132. Gráfica de interacción para el valor mínimo.	198
Figura 3.133. Gráfica de superficie del valor mínimo vs. Inyector. Presión.....	199
Figura 3.134. Gráfica de contorno del valor mínimo vs. Inyector. Presión.	200
Figura 3.135. Gráfica de superficie del valor mínimo vs. Inyector. RPM.	200

Figura 3.136. Gráfica de contorno del valor mínimo vs. Inyector. RPM.	201
Figura 3.137. Gráfica de efectos principales para la potencia en intervalo de frecuencia [μ W].	202
Figura 3.138. Gráfica de interacción para la la potencia en intervalo de frecuencia [μ W].	202
Figura 3.139. Gráfica de superficie de Potencia en intervalo de frecuencia [μ W] vs. Inyector. Presión.	203
Figura 3.140. Gráfica de contorno de Potencia en intervalo de frecuencia [μ W] vs. Inyector. Presión.	204
Figura 3.141. Gráfica de superficie de Potencia en intervalo de frecuencia [μ W] vs. Inyector. RPM.	204
Figura 3.142. Gráfica de contorno de Potencia en intervalo de frecuencia [μ W] vs. Inyector. RPM.	205
Figura 3.143. Gráfica de efectos principales para energía [J].	206
Figura 3.144. Gráfica de interacción para energía [J].	206
Figura 3.145. Gráfica de superficie de Energía [J] vs. Inyector. Presión.	207
Figura 3.146. Gráfica de contorno de Energía [J] vs. Inyector. Presión.	208
Figura 3.147. Gráfica de superficie de Energía [J] vs. Inyector. RPM.	208
Figura 3.148. Gráfica de contorno de Energía [J] vs. Inyector. RPM.	209
Figura 3.149. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.	210
Figura 3.150. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.	210
Figura 3.151. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. Inyector.	211
Figura 3.152. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. Inyector.	212
Figura 3.153. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. RPM.	212

Figura 3.154. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. RPM.....	213
Figura 3.155. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.....	214
Figura 3.156. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.....	214
Figura 3.157. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. RPM.....	215
Figura 3.158. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. RPM.....	216
Figura 3.159. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. Inyector.....	216
Figura 3.160. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. Inyector.....	217
Figura 3.161. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.....	218
Figura 3.162. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.....	218
Figura 3.163. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. Presión.....	219
Figura 3.164. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. Presión.....	220
Figura 3.165. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. RPM.....	220
Figura 3.166. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. RPM.....	221
Figura 3.167. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.....	222
Figura 3.168. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.....	222

Figura 3.169. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. Presión.....	223
Figura 3.170. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. Presión.....	224
Figura 3.171. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. RPM.....	224
Figura 3.172. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. RPM.....	225
Figura 3.173. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.	226
Figura 3.174. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.	226
Figura 3.175. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Presión.	227
Figura 3.176. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Presión.	228
Figura 3.177. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Inyector.....	228
Figura 3.178. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Inyector.....	229
Figura 3.179. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.	230
Figura 3.180. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.	230
Figura 3.181. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. RPM.....	231
Figura 3.182. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. RPM.....	232
Figura 3.183. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. Presión.....	232

Figura 3.184. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. Presión.....	233
Figura 3.185. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.	234
Figura 3.186. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.	234
Figura 3.187. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Inyector.	235
Figura 3.188. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Inyector.....	236
Figura 3.189. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Presión.....	236
Figura 3.190. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Presión.	237

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características del motor CRDI Hyundai Santa Fe 2.0.	23
Tabla 2.2. Resultados de la encuesta realizada sobre las variables más influyentes en la variación de volumen de combustible en los inyectores.	24
Tabla 2.3. Niveles asignados a la presión de inyección en el riel.	26
Tabla 2.4. Proceso de medición de volumen de combustible en los inyectores. ...	28
Tabla 2.5. Volumen de inyección de los inyectores obtenidos en el banco de pruebas.	30
Tabla 2.6. Niveles asignados al porcentaje de volumen de inyección de los inyectores.	30
Tabla 2.7. Niveles asignados al régimen de giro del motor.	30
Tabla 2.8. Variables de respuesta.	31
Tabla 2.9. Variables controlables.	32
Tabla 2.10. Variables no controlables.	32
Tabla 2.11. Combinaciones de los factores en cada bloque.	34
Tabla 2.12. Diseño factorial 2 ²	34
Tabla 2.13. Matriz de Box-Behnken para k = 3.	35
Tabla 2.14. Tratamientos aleatorizados para cada ensayo o prueba.	36
Tabla 2.15 Denominación del código de los tratamientos.	37
Tabla 2.16 Codificación de los tratamientos.	38
Tabla 2.17 Características técnicas de equipo Adash® A3716.	39
Tabla 2.18 Datos técnicos del acelerómetro.	41
Tabla 2.19 Variables para el desarrollo de las pruebas experimentales.	41
Tabla 2.20 Descripción de los puntos de medida de la figura 2.9.	46
Tabla 2.21 Valores de las variables de respuesta características.	65
Tabla 2.21 (continuación) Valores de las variables de respuesta características.	66

Tabla 2.21 (continuación) Valores de las variables de respuesta características.	67
Tabla 2.21 (continuación) Valores de las variables de respuesta características.	68
Tabla 3.1 Frecuencias y elementos relacionados	70
Tabla 3.2 Frecuencias fundamentales.	70
Tabla 3.3 Resultados de la variación de frecuencia X/2 a 820 rpm.	113
Tabla 3.4 Resultados de la variación de frecuencia X/2 a 1660 rpm.	115
Tabla 3.5 Resultados de la variación de frecuencia X/2 a 2500 rpm.	116
Tabla 3.6 Resultados de la variación de frecuencia X a 820 rpm.	117
Tabla 3.7 Resultados de la variación de frecuencia X a 1660 rpm.	119
Tabla 3.8 Resultados de la variación de frecuencia X a 2500 rpm.	120
Tabla 3.9 Resultados de la variación de frecuencia 2X a 820 rpm.	121
Tabla 3.10 Resultados de la variación de frecuencia 2X a 1660 rpm.	123
Tabla 3.11 Resultados de la variación de frecuencia 2X a 2500 rpm.	124
Tabla 3.12 Resultados de la variación de frecuencia 4X a 820 rpm.	125
Tabla 3.13 Resultados de la variación de frecuencia 4X a 1660 rpm.	127
Tabla 3.14 Resultados de la variación de frecuencia 4X a 2500 rpm.	128
Tabla 3.15 Resultados de la variación de frecuencia 6X a 820 rpm.	129
Tabla 3.16 Resultados de la variación de frecuencia 6X a 1660 rpm.	131
Tabla 3.17 Resultados de la variación de frecuencia 6X a 2500 rpm.	132
Tabla 3.18 Resultados de la variación de frecuencia 8X a 820 rpm.	133
Tabla 3.19 Resultados de la variación de frecuencia 8X a 1660 rpm.	135
Tabla 3.20 Nomenclatura utilizada en los diagramas de Pareto de los efectos.	136
Tabla 3.21 Niveles de importancia de los efectos de los factores y sus combinaciones sobre las variables de respuesta.	152
Tabla A3.1 Selección de espectro patrón CRDIMM 0 820 3 41	260
Tabla A3.2 Selección de espectro patrón CRDIMM 0 1660 3 49	261
Tabla A3.3 Selección de espectro patrón CRDIMM 0 2500 3 27	262

Tabla A4.1 Selección de espectro de falla CRDIMM 0 820 1 24.....	264
Tabla A4.2 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 820 2 17.....	264
Tabla A4.3 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 820 2 31.....	264
Tabla A4.4 Selección de espectro de falla CRDIMM 0 1660 2 15.....	264
Tabla A4.5 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 1660 1 21.....	264
Tabla A4.6 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 1660 1 20.....	264
Tabla A4.7 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 1660 3 23.....	264
Tabla A4.8 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 1660 3 22.....	264
Tabla A4.9 Selección de espectro de falla CRDIMM 0 2500 1 25.....	264
Tabla A4.10 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 2500 2 4.....	264
Tabla A4.11 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 2500 2 33.....	264

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se define en primera instancia el sistema de inyección de combustible de un motor de encendido por compresión, posteriormente se analiza el método de vibraciones mecánicas para el mantenimiento predictivo, con el fin de establecer claramente un marco teórico que fundamente el análisis a realizar.

Una vez establecido el fundamento teórico, se procede a definir un diseño experimental y se realizan las respectivas pruebas experimentales, de lo cual se obtienen datos necesarios que posteriormente son procesados por medio de un algoritmo generado en el software matemático Matlab®, resultado de este proceso se definen los espectros de funcionamiento en el motor de encendido por compresión.

Como paso siguiente se procede a definir los espectros patrones de vibración bajo condiciones de funcionamiento normal en el motor de encendido por compresión, además se definen y describen los espectros de los fallos simulados en el motor, luego se establece la validez de los resultados obtenidos, por medio de la comprobación de que los supuestos del modelo se cumplan.

Para finalizar la investigación se procede a realizar un análisis y presentación de los resultados, lo que conlleva a conclusiones con respecto a la determinación e identificación de las fallas mediante el análisis de las vibraciones mecánicas, también se presentan recomendaciones a tomar en cuenta para este tipo de proyectos investigativos, así como también se establecen trabajos a futuro relacionados con el tema en estudio.

PRESENTACIÓN

Al examinar las múltiples fallas que se producen en un motor de encendido por compresión, resultan ser de interés las producidas en el sistema de inyección por la variación de volumen de combustible en los inyectores, lo que ocasiona en el motor pérdida de potencia, calentamiento excesivo, aumento en el consumo de combustible, falla del motor al acelerar, problemas en el arranque del motor, entre otros.

Para lograr detectar específicamente el fallo en el motor debido a una variación de volumen del combustible en los inyectores, es necesario en ocasiones desmontar el sistema de inyección de combustible e ir verificando el correcto funcionamiento de cada elemento en el sistema, lo cual conlleva tiempo y por lo general es de elevado costo.

En investigaciones previas se ha realizado la descripción de diagnóstico de fallos en la combustión de un motor de encendido por compresión, mediante el análisis de patrones de vibración, considerando condiciones de funcionamiento normales y condiciones de falla, dando como resultado la percepción del fallo a través de la forma de onda en análisis con respecto al tiempo y su posterior análisis en el dominio de la frecuencia, por lo tanto este método es una importante forma de analizar el fallo en el motor de combustión ya que la señal proporciona información directa del comportamiento del motor.

Con el desarrollo de este proyecto investigativo, se busca establecer un proceso de obtención de espectros de funcionamiento, por medio de análisis de vibraciones y obtener así un banco de datos que permita determinar diversos fallos causados por variación de volumen de combustible en los inyectores.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN

En un motor de encendido por compresión, el aire introducido en el cilindro se comprime, obteniendo temperaturas sobre los 600 °C, en estas condiciones de aire caliente, se inyecta combustible pulverizado a alta presión. El combustible se inflama por la elevada temperatura del aire y la combustión se ve favorecida por la gran cantidad de oxígeno que se encuentra alrededor de cada una de las gotas de combustible inyectadas.¹ El sistema de inyección es el encargado de graduar, pulverizar e introducir, en el instante y por el tiempo adecuado, el combustible al cilindro.

1.1.2 SISTEMA DE INYECCIÓN

El motor diésel requiere una alimentación bien dosificada de combustible y que la inyección se realice en el momento exacto, en un tiempo muy corto al finalizar la carrera de compresión, durante el cual, la bomba de inyección impulsa el combustible y lo inyecta en cantidad exacta en la cámara de combustión, a través del inyector. En el tiempo de admisión se aspira solamente aire, el cual se calienta en el tiempo de compresión hasta tal punto que el combustible inyectado al final de este tiempo se inflama por sí solo.²

¹ Sánchez, E. *Sistemas Auxiliares del Motor*. p. 255. Macmillan Profesional.

² Alonso, J. M. 2000. *Técnicas del Automóvil*. Décima Edición. p. 597; España. Paraninfo.

El sistema de inyección es una parte del motor diésel que se encuentra entre las más delicadas y difíciles, pues debe inyectarse el combustible en el cilindro, cuando éste se encuentra a una presión significativa, lo cual dificulta en gran medida el ingreso del combustible. En consecuencia, la presión de inyección debe ser elevada y el combustible ha de ingresar finamente pulverizado, para que la combustión se inicie simultáneamente en la mayor parte del combustible inyectado y se propague inmediatamente a todo el volumen de la cámara de combustión. Además, el tiempo de la inyección se da en milésimas de segundo y deben producirse muchas inyecciones en poco tiempo, sobre todo cuando el motor gira rápidamente. Así pues, el sistema de inyección deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Introducir en el cilindro el combustible preciso en cada momento según las necesidades de funcionamiento del motor.
- Distribuir el combustible a los diferentes cilindros y en cantidades iguales para cada uno de ellos e inyectándolo en el momento oportuno.
- Pulverizar el combustible repartiéndolo uniformemente en la cámara de combustión.³

1.1.3 COMPONENTES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

El sistema de inyección puede dividirse en dos partes primordiales:

- Circuito de alta presión, cuya misión es la de impulsar el combustible a una determinada presión, suficiente para ser introducido en la cámara de combustión.
- Circuito de baja presión, el cual debe hacer llegar el combustible a la bomba de inyección, desde el depósito en el que se encuentra.

En la figura 1.1 se puede apreciar de forma esquemática el conjunto de los circuitos de baja presión o alimentación y de alta presión o inyección para una bomba de elementos en línea. Están formados, el primero por un depósito de combustible (1),

³ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p. 55. España. Paraninfo.

la bomba de alimentación (2), y el filtro (3); el segundo por la bomba de inyección (4), y los inyectores (5)⁴.

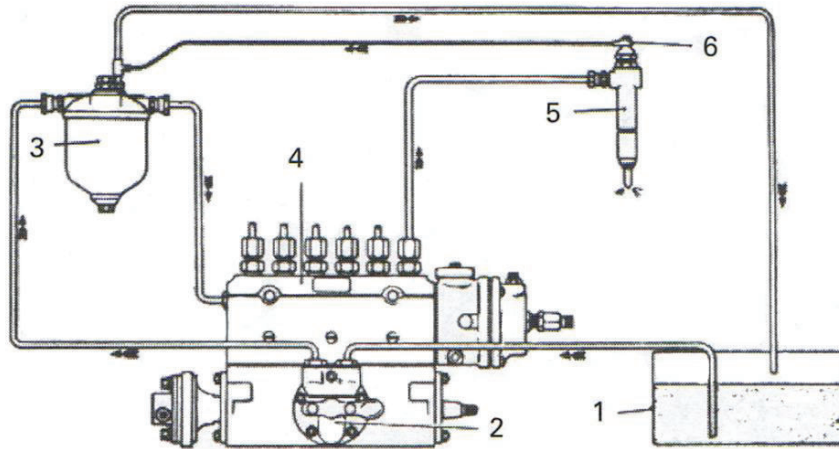


Figura 1.1. Esquema de los circuitos de baja presión y de alta presión para una bomba de elementos en línea.⁴

A continuación se realiza una breve descripción de los inyectores y del sensor de presión en el riel (RPS), elementos de importancia para el presente proyecto.

1.1.3.1 Inyectores⁵

El objetivo del inyector es la de pulverizar el combustible que se introduce en la cámara de combustión y distribuirlo uniformemente en el seno del aire comprimido.⁶

Para obtener una buena combustión se requiere que el combustible inyectado esté finamente pulverizado, alcanzando su rápida inflamación, pues lo primero que se quema de las gotas de combustible es su capa exterior y luego su parte interior.

⁴ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p. 35. España. Paraninfo.

⁵ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. pp. 58-64. España. Paraninfo.

⁶ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p. 55. España. Paraninfo.

Por lo tanto, cuanto más grande sea la gota mayor es su capa exterior y más tiempo tarda en inflamarse. El inyector pulveriza el combustible en la medida idónea.

El inyector se fija a la cámara de combustión mediante el porta inyector que está formado por un cuerpo A (figura 1.2) al que se acopla el inyector, también llamado tobera, el cual está constituido por el cuerpo C y la aguja B. Estos se unen por la tuerca D.

En la figura 1.2 se puede apreciar que, en el interior del cuerpo del porta inyector se aloja la varilla E, aplicada contra la aguja B por la acción del muelle F, cuya fuerza es regulable por medio del tornillo G y contratuerca H. El combustible llega al porta inyector por la canalización K y pasa al inyector a través de un conducto lateral. El sobrante de combustible circula alrededor de la varilla empujadora E, para salir por la canalización J, que lo lleva al depósito de combustible por el circuito de retorno. En la parte superior del porta inyector se encuentra el sistema de reglaje de la presión del inyector. Mediante el tornillo G puede variarse la presión ejercida por el muelle. El sistema está protegido por el tapón I.

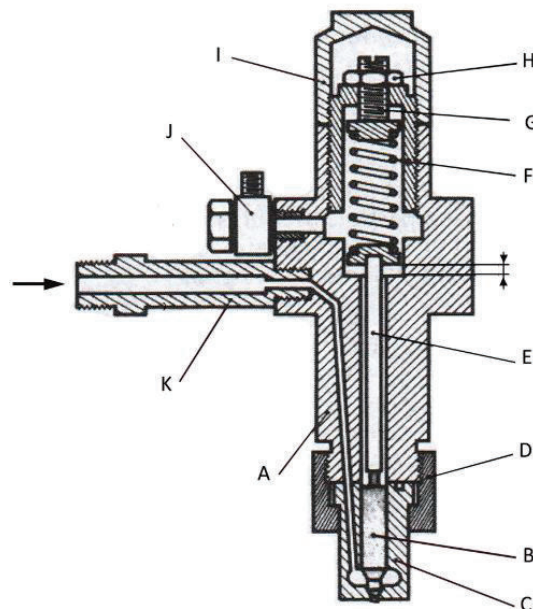


Figura 1.2. Porta inyector e inyector.⁷

⁷ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p. 59. España. Paraninfo.

Las superficies de unión del inyector al porta inyector deben estar perfectamente mecanizadas, caso contrario se producirán fugas de combustible que originarían un funcionamiento defectuoso del motor.

El inyector propiamente dicho, está constituido por dos partes: aguja y cuerpo las cuales se pueden apreciar en la figura 1.3. Estas dos piezas están unidas y presentan un juego de acoplamiento del orden de 2 a 4 micras. El cuerpo A dispone de un agujero en el que se aloja la aguja B, que en su parte inferior está provista de dos superficies cónicas C y D, de las cuales, la última se apoya en el asiento formado en el cuerpo, y la superior C es la que recibe el empuje del líquido que provoca el levantamiento de la aguja. Alrededor del cono C se forma una cámara E, a la que llega el combustible a presión por el conducto F, procedente de la bomba de inyección. La salida del combustible se realiza por el orificio G. La aguja B se mantiene contra su asiento por medio de un muelle montado a una presión determinada.

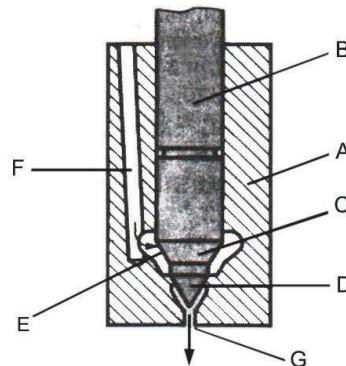


Figura 1.3. Inyector.⁸

Por los diferentes tipos de cámaras de combustión utilizadas en los motores diésel, existen dos tipos principales de inyectores, los de orificios y los de tetón o espiga, de entre los cuales existe diversidad de variantes, cada una está diseñada para una aplicación específica.

⁸ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p. 59. España. Paraninfo.

Las toberas de orificio producen una pulverización bastante fuerte y se abre con presiones elevadas (del orden de 150 a 200 bar) y por este motivo se aplican exclusivamente a los sistemas de inyección directa. En la figura 1.4 se aprecia toberas de este tipo.

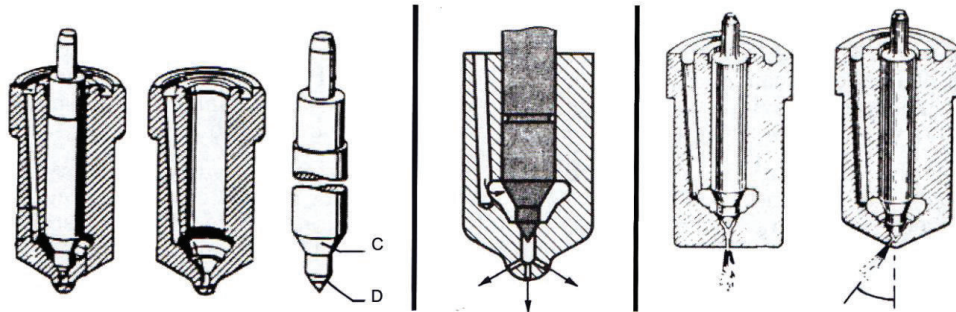


Figura 1.4. Tobera de varios orificios y tobera de orificio único.⁹

Los inyectores de tetón o espiga se utilizan generalmente en motores de inyección indirecta, es decir, con precámaras de inyección, en donde la presión de apertura oscila entre 90 y 125 bar. En este tipo de inyector, la aguja está provista en su extremo de una espiga pulverizadora, que penetra con un juego reducido en el orificio del cuerpo del inyector. En la figura 1.5 se indica inyectores de espiga con extremo cilíndrico y con extremo cónico.

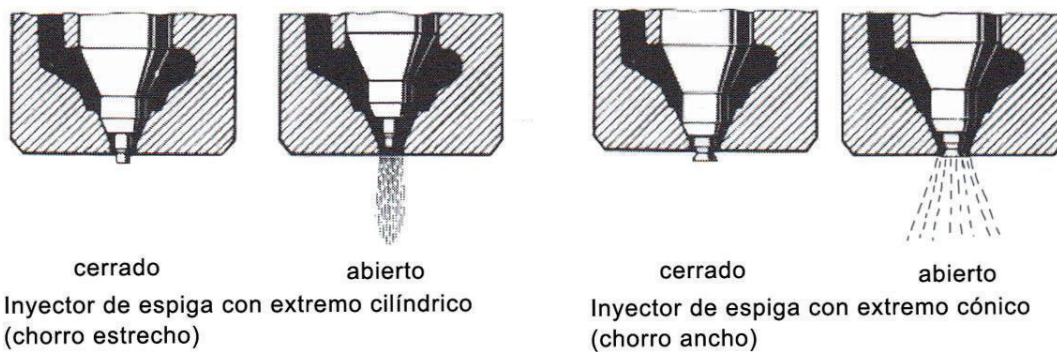


Figura 1.5. Toberas o inyectores de espiga.¹⁰

⁹ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p. 62. España. Paraninfo.

¹⁰ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p. 63. España. Paraninfo.

1.1.3.2 Sensor de presión en el riel RPS

Este sensor es el encargado de emitir una señal de voltaje a la ECU que corresponde a la presión aplicada en el riel. El sensor debe medir la presión instantánea con una precisión adecuada y lo más rápidamente posible.

El combustible fluye hacia el sensor de presión a través de una abertura en el riel, la cual está cerrada por el diafragma del sensor. El combustible a presión presiona el diafragma del sensor a través de un agujero ciego. Un elemento sensor (dispositivo semiconductor) está montado en este diafragma para realizar la conversión de la presión en una señal eléctrica. La señal generada por el sensor se introduce en un circuito de evaluación que amplifica la señal de medición y la envía a la ECU. En la figura 1.6 se muestra un esquema del sensor de presión en el riel.

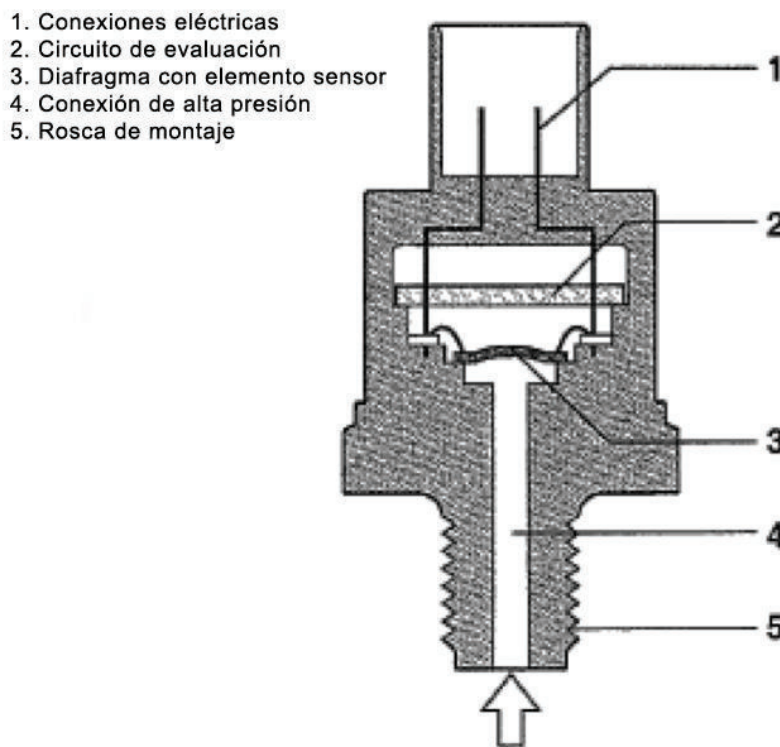


Figura 1.6. Esquema del sensor de presión en el riel. ¹¹

¹¹ Alonso, J. M. 2001. *Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel*. p.65. España. Paraninfo.

1.1.4 TIPOS DE SISTEMAS DE INYECCIÓN

Existen diferentes tipos de sistemas de inyección, los cuales se citan a continuación:

- Bombas de inyección PF y PFR
- Bombas en línea
- Bombas distribuidoras (rotativas)

Existen además, nuevos sistemas de inyección diésel electrónicos entre los cuales se tiene:

- Bomba VP 44
- UPS (Sistema de Bomba Unitaria)
- UIS (Sistema de unidad inyectora)
- CRS (Sistema Common Rail)¹²

A continuación se analiza el Sistema Common Rail ya que la presente investigación se desarrolla en un motor que utiliza este tipo de sistema.

1.1.4.1 Sistema Common Rail (CRS)

El moderno sistema Common Rail presenta la más nueva tecnología empleada en sistemas de inyección electrónica.

En este sistema, la generación de presión y la inyección de combustible están separadas, lo que significa que la bomba genera la alta presión que está disponible para todos los inyectores a través de un tubo distribuidor común, que puede ser controlada de manera independiente de las revoluciones del motor.

La presión del combustible e inicio y fin de inyección, son justamente calculados por la unidad de comando a partir de la información obtenida de los diferentes sensores instalados en el motor, proporcionando así excelente desempeño, bajo ruido y la mínima emisión de gases contaminantes.

¹² http://www.inyecciondiesel.cl/web/documentos/Sistemas_de_Inyecci%C3%B3n_Diesel.pdf

En la figura 1.7 se presenta un esquema de este sistema.



Figura 1.7. Sistema Common Rail. ¹³

En el Sistema Common Rail la presión de inyección es independientemente del número de revoluciones del motor y de la cantidad de combustible a inyectar, pudiendo ser elegida libremente. Durante la inyección la presión es prácticamente constante delante del inyector, alcanzando un máximo de 1600 bar.

En la figura 1.8 se presenta la disposición de los componentes del sistema, en la que se aprecian las señales de entrada de los sensores y salida de la unidad electrónica hacia las electroválvulas y bomba.¹⁴

*1.1.4.1.1 Ventajas del Sistema Common Rail*¹⁵

Las ventajas de aplicar un sistema de este tipo de inyección son:

- La presión de inyección es independiente del régimen de giro del motor.
- La presión de inyección es completamente variable y es adaptada por la unidad de mando.
- Existe la posibilidad de realizar pre inyección, inyección y post inyección.

¹³ http://www.inecciondiesel.cl/web/documentos/Sistemas_de_Inyecci%C3%B3n_Diesel.pdf

¹⁴ Martínez, H. 2009. *Enciclopedia Práctica del Automóvil, Reparación y Mantenimiento*. p. 313. España. Cultural S.A.

¹⁵ Martínez, H. 2009. *Enciclopedia Práctica del Automóvil, Reparación y Mantenimiento*. p. 317. España. Cultural S.A.

- Se adapta a las exigentes normas de anticontaminación.

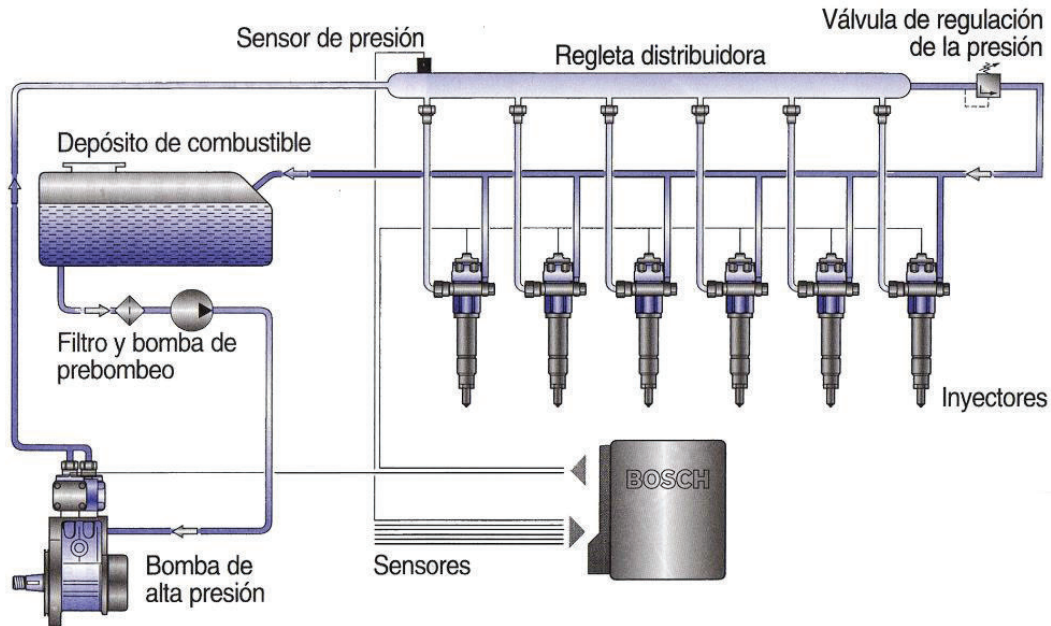


Figura 1.8. Esquema de las componentes de un sistema de inyección common rail. ¹⁶

1.1.4.1.2 Funcionamiento del Sistema Common Rail¹⁷

En los sistemas de inyección common rail se encuentran por separado la generación de la propia alta presión y la inyección. Para generar la alta presión se utiliza una bomba de alta presión, independientemente del régimen y carga del motor, así como del caudal necesario. El combustible es acumulado en el interior de un conducto de alta presión, común a todos los inyectores. Un sistema electrónico es el encargado de controlar, la duración, la presión y el momento de la inyección. Para ello utiliza una válvula electromagnética en cada uno de los inyectores. El sistema electrónico está compuesto por una serie de sensores,

¹⁶ Martínez, H. 2009. *Enciclopedia Práctica del Automóvil, Reparación y Mantenimiento*. p. 314. España. Cultural S.A.

¹⁷ Martínez, H. 2009. *Enciclopedia Práctica del Automóvil, Reparación y Mantenimiento*. p. 316. España. Cultural S.A.

actuadores y un sistema micro-procesador, encargado de realizar los cálculos necesarios, abarcando así:

- Una unidad de control microprocesador.
- Sensor de revoluciones y posición angular del cigüeñal.
- Sensor de posición del árbol de levas.
- Sensor de posición del pedal de acelerador.
- Sensor de presión de sobrealimentación.
- Sensor de presión del Riel.
- Sensor de temperatura del líquido refrigerante y del aire.
- Sensor de cantidad de aire admitido.
- Inyectores de alta presión.
- Regulador de presión de aire.
- Regulador de presión del Rail.

La unidad de control es la encargada de conocer en todo momento el funcionamiento del motor. Gracias al sensor de posición del pedal de acelerador es capaz de interpretar los deseos del conductor. La unidad de mando del motor compara el funcionamiento actual del motor con el deseo del conductor y, si es necesario, interviene en la gestión de los inyectores para poder así responder a la solicitud de par exigida. El sensor de revoluciones y posición angular del cigüeñal es utilizado, junto al sensor del árbol de levas para conocer la posición y momento del motor. El medidor de masa de aire informa a la unidad de mando del motor sobre la cantidad de aire aspirado, para poder adaptar la combustión a los límites exigidos por las normas anticontaminación. Si el motor es sobrealimentado la unidad de control utiliza un bucle de control entre el sensor de presión de sobrealimentación y el regulador de presión, de manera que pueda optimizar tanto la respuesta a la solicitud del par motor por parte del conductor como el cumplimiento de normativas de gases de escape. En función de la información del sensor de temperatura de motor, la unidad de control también determina el momento de inyección y factores correctivos sobre el tiempo de inyección, así como otros parámetros como la inyección previa, la post inyección o incluso el tiempo necesario de pre y post calentamiento, con la intención de evitar la emisión de contaminantes y ruidos de combustión. Además en función del tipo de vehículo se

encuentran conectados diversos sensores adicionales, intercambio de datos con el resto de unidades de mando, con la intención de mejorar el confort de marcha, así como la seguridad.

1.2 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE VIBRACIONES MECÁNICAS PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

1.2.1 DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO¹⁸

Se llama mantenimiento predictivo, mantenimiento condicional o mantenimiento basado en la condición, al mantenimiento preventivo sometido a la superación de un umbral predeterminado y significativo del estado de deterioro de un bien.

El mantenimiento predictivo trata de un conjunto de técnicas que, debidamente seleccionadas, permiten el seguimiento y examen de ciertos parámetros característicos del equipo en estudio, que manifiestan algún tipo de modificación al aparecer una anomalía en el mismo.

La mayoría de los fallos en máquinas aparecen de forma incipiente, en un grado en que es posible su detección antes que el mismo ocurra con repercusiones irreversibles tanto en la producción como en los costes de mantenimiento. Se precisa establecer un seguimiento de aquellos parámetros que pueden avisar del inicio de un deterioro y establecer para cada uno de ellos qué nivel se va a admitir como normal y cuál inadmisibles, de tal forma que su detección desencadene la actuación oportuna.

En la figura 1.9 se puede observar el proceso descrito con anterioridad, al mismo se le denomina curva P-F, porque muestra cómo un fallo inicia y persiste el deterioro hasta un punto en el que puede ser detectado (el punto P de fallo potencial). A partir de allí, si no se detecta y no se toman las medidas oportunas, el deterioro continúa hasta alcanzar el punto F de fallo funcional.

¹⁸ Díaz Navarro, J. 2004. *Técnicas de Mantenimiento Industrial*. pp. 176-177. Escuela Politécnica Superior-Algeciras. Universidad de Cádiz. España.

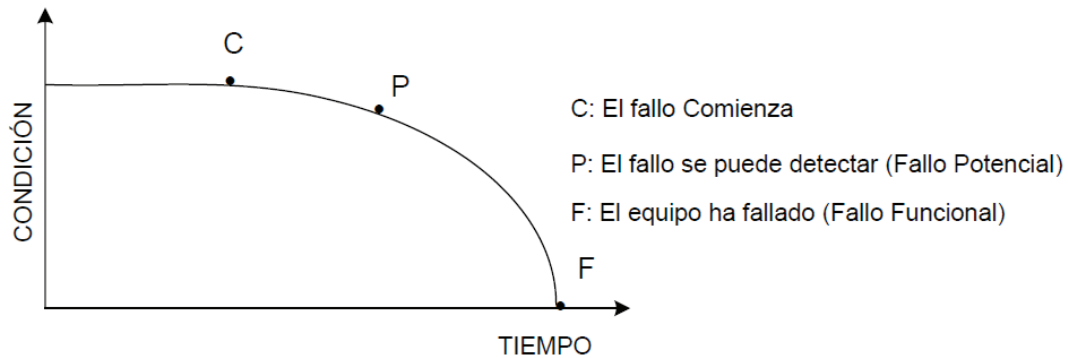


Figura 1.9. Curva P-F de un fallo. ¹⁹

El seguimiento y control de los parámetros se pueden realizar mediante vigilancia periódica, para lo cual es importante establecer una frecuencia que permita detectar el deterioro en un momento entre P y F.

Las ventajas que contribuye este tipo de mantenimiento son:

- Al conocerse en todo momento el estado de los equipos, permite detectar fallos en estado inicial, lo que impide que éste alcance proporciones indeseables.
- Aumentar la vida útil de los componentes, evitando el reemplazo antes de que se encuentren dañados.
- Al conocerse el estado de un defecto, pueden programarse las paradas y reparaciones previéndose los repuestos necesarios, lo que hace disminuir los tiempos de indisponibilidad.

1.2.1.1 Método de Vibraciones en el Mantenimiento Predictivo²⁰

Todas las máquinas en uso tienen un cierto nivel de vibraciones debidas a holguras, pequeños desequilibrios, rozamientos, entre otros. El nivel de vibración aumenta si,

¹⁹ Díaz Navarro, J. 2004. *Técnicas de Mantenimiento Industrial*. p. 176. Escuela Politécnica Superior-Algeciras. Universidad de Cádiz, España.

²⁰ Díaz Navarro, J. 2004. *Técnicas de Mantenimiento Industrial*. p. 183. Escuela Politécnica Superior-Algeciras. Universidad de Cádiz, España.

además, existe algún defecto como desequilibrio mecánico, cojinetes defectuosos, entre otros. Por tal razón el nivel de vibración puede ser usado como parámetro de control funcional para el mantenimiento predictivo de máquinas, estableciendo un nivel de alerta y otro inadmisibles a partir del cual la fatiga generada por los esfuerzos alternantes provoca el fallo inminente de los órganos afectados.

La medida del nivel vibratorio es un indicador de la severidad del fallo y el análisis espectral se emplea para el diagnóstico del tipo de fallo.

El objetivo final del mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas es el de asegurar un adecuado funcionamiento de las máquinas por medio de la vigilancia continua de los niveles de vibración en las mismas, siendo estos, los indicadores de su estado; y se realiza sin necesidad de acudir a desmontajes y revisiones periódicas.²¹

1.2.1.2 Ventajas y desventajas del Análisis por Vibraciones aplicado al Mantenimiento Predictivo²²

Las ventajas que presenta el análisis por vibraciones aplicado al mantenimiento de la maquinaria son:

- Pronta detección e identificación de fallas sin tener que parar la máquina ni de realizar cualquier tipo de desmontaje en la misma.
- Observación continua de la evolución de la falla en el transcurso del tiempo hasta que la misma sea un peligro.
- Planificación adecuada del abastecimiento de repuestos y mano de obra para ejecutar una reparación específica.
- Programación de una intervención de mantenimiento que requiera una parada de la máquina y del proceso que realice.

²¹ Mosquera, G. 2001. *Las Vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo*. p. 5. Centro de Altos Estudios Gerenciales – Instituto Superior de Investigación y Desarrollo. Caracas. Venezuela.

²² Mosquera, G. 2001. *Las Vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo*. pp. 7-8. Centro de Altos Estudios Gerenciales – Instituto Superior de Investigación y Desarrollo. Caracas. Venezuela.

- Disminución del tiempo de reparación, por la perfecta identificación de los elementos averiados, desgastados, es decir los propensos a fallar.
- Incremento de la producción y reducción de costos por la disminución de tiempos muertos y número de paradas.
- Se puede identificar las condiciones de operación de la maquinaria.
- Genera toma de decisiones más acertadas y un funcionamiento más seguro de la planta.

Entre las desventajas se puede establecer que el empleo de esta técnica requiere de un mínimo de personal calificado, que puede ser seleccionado entre los trabajadores de la empresa, además requiere equipos de alta tecnología; por lo que su aplicación se ve limitada supuestamente, por la inversión inicial. Sin embargo, al comparar los resultados que se pueden alcanzar, inclusive a corto plazo, éstos superan de manera satisfactoria la inversión en ésta técnica.

1.2.2 DIAGNÓSTICO DE AVERÍAS POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES²³

1.2.2.1 Fundamentos

Todos los problemas mecánicos son fuentes de vibración, de ahí que de todas las técnicas predictivas (vibraciones, termografía, análisis de aceites, ferrografía, entre otros) la vibración es la más empleada debido a que permite conocer el estado de la maquinaria, su evolución y determinar el origen de la misma.

Los parámetros a considerar en relación con el análisis de las vibraciones mecánicas son:

- La vibración es un movimiento periódico. Es por lo general una superposición de varios movimientos periódicos con frecuencias y amplitudes variables que sumados dan lugar a movimientos periódicos complejos.
- Frecuencia: número de ciclos por unidad de tiempo, (Hz (hertzios) = CPS). Es la inversa del período.

²³ Díaz Navarro, J. 2004. *Técnicas de Mantenimiento Industrial*. pp. 208-209. Escuela Politécnica Superior-Algeciras. Universidad de Cádiz; España.

- Período: es el tiempo que se invierte en un ciclo vibratorio completo (segundos).
- Amplitud: es la intensidad o magnitud de la vibración. Puede expresarse como: desplazamiento, velocidad o aceleración.
 - Desplazamiento: es la magnitud más adecuada para bajas frecuencias (hasta 10Hz) donde las aceleraciones son bajas.

$$X = x * \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

Suele expresarse en:

Micras μ = milésima de mm. ó

mil = milésima de pulgada.

- Velocidad: magnitud más adecuada para rango medio (10 a 1.000 Hz), donde se suelen presentar la mayor parte de los problemas mecánicos:

$$V = \frac{dx}{dt} = \omega x * \cos(\omega t) = \omega x * \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.2)$$

Suele expresarse en:

μ/s = micras por segundo ó en

mil/s = milésima de pulgada por segundo.

- Aceleración: magnitud para medida a altas frecuencias (>1000 Hz).

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x * \sin(\omega t) = \omega^2 x * \sin(\omega t + \pi) \quad (1.3)$$

Se expresa en:

μ/s^2 = micras por segundo al cuadrado o en

mil/s^2 = milésima de pulgada por segundo al cuadrado.

Cada una de estas tres magnitudes se pueden expresar como:

Valor Pico (P)

Valor Pico a Pico (P-P) = 2P

$$\text{RMS} = \text{Valor Eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t x^2(t) dt} = 0.707P \quad (1.4)$$

$$\text{AVG} = \text{valor medio} = \frac{1}{T} \int_0^t \bar{x} dt = 0.637P \quad (1.5)$$

Estas cuatro magnitudes se representan en la figura 1.10.

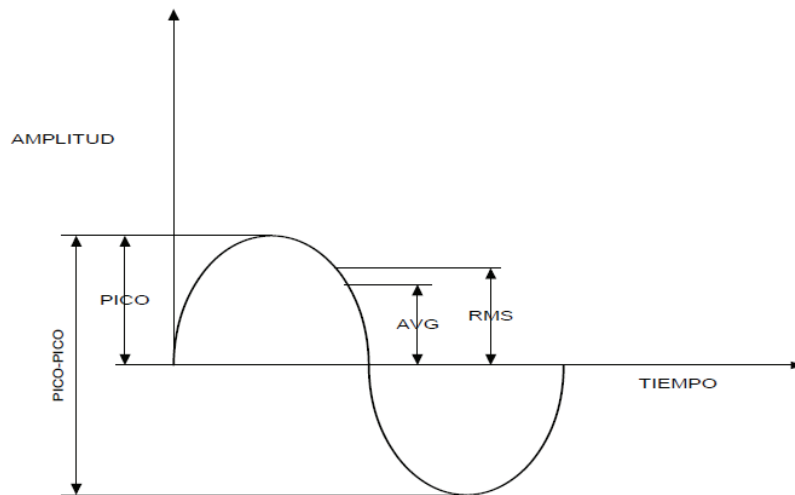


Figura 1.10. Formas de presentación de la amplitud en una onda. ²⁴

1.2.2.2 Análisis de Señales²⁵

Las vibraciones no son únicamente propiedad de los sistemas mecánicos. Todos los sistemas físicos tienen la propiedad de vibrar y estas vibraciones definirán su comportamiento dinámico. Por tal razón, las vibraciones emitidas tienen una forma de representación que caracteriza al sistema del cual proceden.

Las señales obtenidas por el método de vibraciones se puede dividir en dos grupos; el primer grupo está integrado por aquellas señales que representan un fenómeno

²⁴ Díaz Navarro, J. 2004. *Técnicas de Mantenimiento Industrial*. p. 209. Escuela Politécnica Superior-Algeciras. Universidad de Cádiz; España.

²⁵ Mosquera, G. 2001. *Las Vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo*. pp. 23-74. Centro de Altos Estudios Gerenciales – Instituto Superior de Investigación y Desarrollo. Caracas, Venezuela.

que puede ser descrito por una expresión matemática relativamente sencilla en cualquier instante de tiempo y son denominadas determinísticas. Las señales restantes se denomina no determinísticas o aleatorias.

A continuación se presenta la clasificación de estas señales. Las señales determinísticas pueden subdividirse en dos grupos señales periódicas y no periódicas.

- a) Señales periódicas.- son las que caracterizan a los sistemas mecánicos cuyos movimientos oscilatorios se repiten cada cierto período de tiempo completándose un ciclo en cada intervalo. El Movimiento Armónico Simple (MAS) es la base para el análisis de este tipo de señales.

En este tipo de señales se encuentran:

- señales periódicas complejas
 - oscilaciones de igual frecuencia
 - oscilaciones de frecuencia diferentes
 - oscilaciones perpendiculares entre sí con igual frecuencia
 - oscilaciones perpendiculares entre sí de frecuencias diferentes
- b) Señales no periódicas.- en este grupo se encuentran las señales que provienen de los sistemas que presentan movimientos oscilatorios cuasi periódico y de los sistemas donde se producen movimientos transitorios. En esta clasificación se encuentran:
- las vibraciones cuasiperiódicas
 - señales transitorias dentro de la cual se tiene:
 - la vibración libre amortiguada
 - fuerzas impulsivas
- c) Vibraciones forzadas.- se dan cuando los sistemas están bajo la acción de un agente externo. En esta clasificación se tiene:
- vibraciones forzadas no amortiguadas
 - vibraciones forzadas amortiguadas
- d) Señales aleatorias, éstas corresponden a las señales no determinísticas o aleatorias y se clasifican en estacionarias y no estacionarias.

CAPÍTULO 2

OBTENCIÓN DE DATOS Y TRATAMIENTO DE LOS ESPECTROS DE FUNCIONAMIENTO EN EL MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

2.1 DEFINICIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL UTILIZANDO TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO CONTÍNUO

2.1.1 INTRODUCCIÓN

En distintos campos de la investigación es común efectuar experimentos o pruebas con el objetivo de minimizar y llegar a resolver problemas en un proceso determinado.

El diseño estadístico de experimentos es una herramienta fundamental ya que es una manera eficaz de realizar pruebas en los procesos, proporcionando las técnicas y estrategias necesarias para llevar de manera óptima los procesos a mejores condiciones de operación.

De los experimentos o pruebas planteados con ayuda del diseño estadístico de experimentos se obtendrán datos, que al ser analizados estadísticamente darán paso a conclusiones y a la toma de decisiones que conlleven a mejoras del desempeño del proceso analizado.

Es necesario establecer que el diseño de experimentos es un conjunto de técnicas que no esperan que el proceso mande las señales útiles, sino que éste se manipula para inducirlo a proporcionar esa información que se requiere para mejorarlo.

En la presente investigación se experimentó en un motor CRDI cuya marca comercial es Hyundai, modelo Santa Fe 2.0, haciendo cambios estratégicos y deliberados al proceso de inyección de combustible para provocar señales útiles. Al proceder a analizar los resultados de los experimentos planteados se tendrá los

modelos a seguir, dando lugar a conclusiones efectivas y objetivas acerca del proceso en análisis.

2.1.2 EL USO DEL MEJORAMIENTO CONTINUO²⁶

El diseño de experimentos es considerado como una importante estrategia de la optimización y la mejora continua en productos, servicios y procesos, que se suele ajustar al ciclo de Deming, el mismo que se describe en la figura 2.1, en la que se puede apreciar las cuatro etapas en las que consiste.

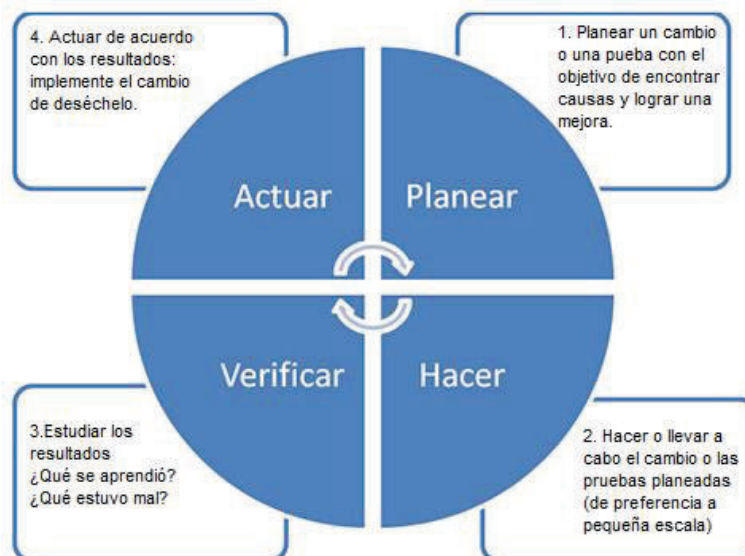


Figura 2.1. Ciclo de Deming.²⁷

Al aplicar el ciclo de Deming al diseño experimental se tendrán las siguientes etapas:

²⁶ Gutiérrez Pulido, H. & De La Vara Salazar, R. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda Edición. pp. 322-323. México. McGraw-Hill.

²⁷ Gutiérrez Pulido, H. & De La Vara Salazar, R. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda Edición. p. 323. México. McGraw-Hill.

1. Planear un experimento. Lo primero es localizar un problema importante que sea susceptible de atacarse con diseño de experimentos. La importancia del problema se puede cuantificar con base en la pérdida que causa al equipo a ser analizado. Una vez ubicado el problema se determinan los factores controlables que pudieran tener alguna influencia sobre la característica de calidad de interés. Se diseña el plan experimental más adecuado a la situación, con lo cual quedan especificadas las corridas del proceso que han de realizarse: cuáles tratamientos y cuántas repeticiones de cada uno.
2. Hacer las corridas experimentales. Se prueba el proceso en cada tratamiento especificado en la etapa de planeación. Las corridas se hacen en orden aleatorio y de acuerdo al plan experimental seleccionado.
3. Verificar o analizar los resultados. Consiste en analizar los datos con las técnicas adecuadas. Verificar los supuestos y determinar el mejor tratamiento (o tratamiento ganador) para la variable de respuesta que es objeto de estudio.
4. Implementación de los resultados. Obtener las variables más significativas que incidan en el problema, de manera que se pueda establecer mejoras para el proceso en estudio.

2.1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Considerando las múltiples fallas que se producen en un motor de encendido por compresión, resultan ser de interés las producidas en el sistema de inyección por mal funcionamiento de los inyectores, lo que ocasiona en el motor pérdida de potencia, calentamiento excesivo, aumento en el consumo de combustible, falla del motor al acelerar, problemas en el arranque del motor, entre otros. Para lograr detectar específicamente el fallo en el motor debido a los inyectores, es necesario en ocasiones desmontar el sistema de inyección e ir verificando el funcionamiento de cada inyector en un banco de pruebas lo cual conlleva tiempo y por lo general es de elevado costo, por lo tanto, con el desarrollo de este trabajo, se persigue establecer un proceso de obtención de espectros de funcionamiento por medio de

análisis de vibraciones y un banco de datos que permita determinar diversos fallos causados por variación de volumen de combustible en los inyectores.

2.1.4 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO

A continuación se detallan los componentes necesarios para el planteamiento del diseño del experimento:

2.1.4.1 Unidad experimental

La unidad experimental está definida como la pieza(s) que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba o muestra.²⁸ Para la presente investigación se utilizó un motor CRDI cuya marca comercial es Hyundai, modelo Santa Fe 2.0, mismo que se puede apreciar en la figura 2.2 y cuyas características son detalladas en la tabla 2.1.



Figura 2.2. Motor CRDI, marca Hyundai, modelo Santa Fe 2.0.²⁹

²⁸ Gutiérrez Pulido, H. & De La Vara Salazar, R. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda Edición. pp. 322-323. México. McGraw-Hill.

²⁹ Fuente: Los autores.

Tabla 2.1. Características del motor CRDI Hyundai Santa Fe 2.0. ³⁰

Descripción		Unidades	Detalle
Marca		-	Hyundai
Modelo		-	Santa Fe
Modelo No.		-	G – 120212
Cilindraje		cm ³	1991
Número de cilindros		-	4
Diámetro de cilindro		mm	83+0.03
Carrera del pistón		mm	92
Relación de compresión		-	17.3:1
Orden de encendido		-	1-3-4-2
Sistema de inyección		-	CRDI
Potencia máxima		kW / rpm	103 / 4000
Dimensiones	Largo	mm	504
	Ancho	mm	669
	Altura	mm	671

2.1.4.2 Determinación de variables, factores y niveles

En cualquier proceso intervienen diferentes factores que pueden ser controlados o no controlados y son las variables que se investigan en el experimento, respecto de como influyen o afectan a las que se conocen como variables de respuesta, estas últimas representan el efecto o el resultado de cada prueba experimental.

2.1.4.2.1 Factores a analizar

Para determinar los factores de estudio en la presente investigación se procedió a indagar sobre las variables más influyentes en la variación de volumen de combustible en los inyectores en un motor de combustión interna alternativo a diésel, esto se logró a través de una encuesta realizada a distintos profesionales de la rama automotriz en la ciudad de Cuenca, las cuales se encuentran en el anexo 1. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.2, basándose en estos resultados se efectuó un análisis por medio del diagrama de Pareto que se muestra

³⁰ <http://www.arpem.com/coches/hyundai/tucson>

en la figura 2.3, con el objetivo de identificar las variables más influyentes en el proceso descrito anteriormente.

En función del análisis realizado por el método de diagrama de Pareto, el cual establece que entre un grupo de elementos o factores que contribuyen a un mismo efecto, unos pocos son responsables de la mayor parte de dicho efecto, teniendo así a los pocos vitales que son los factores más importantes en el proceso y a los muchos triviales los cuales son los factores poco importantes en el proceso, según esta definición, se identifican claramente las tres variables más influyentes a analizar en el presente trabajo de investigación, las cuales son: presión de inyección en el riel, estado físico del inyector y régimen de giro.

Tabla 2.2. Resultados de la encuesta realizada sobre las variables más influyentes en la variación de volumen de combustible en los inyectores.³¹

Variables Encuestas	Presión de inyección	Estado físico del inyector	Régimen de giro	Temperatura del combustible	Cantidad de aire de entrada MAF o MAP	Tiempo de inyección	Turbo	Estado físico de la bomba de alimentación	Temperatura de refrigerante ECT	Presión de admisión (turboalimentados)	Composición del combustible
Encuesta 1	4	4	3								
Encuesta 2	4	4	4								
Encuesta 3	4	3	4		4				3	3	
Encuesta 4	4	4	3	3							3
Encuesta 5	4	3	4								
Encuesta 6	4	3	4	4		4					
Encuesta 7	4	4	3				4	4			
Encuesta 8	4	4	3								
Encuesta 9	4	3	3								
Puntaje	36	32	31	7	4	4	4	4	3	3	3
Puntaje acumulado	36	68	99	106	110	114	118	122	125	128	131
Porcentaje puntaje acumulado	27,48	51,9	75,57	80,91	83,97	87,02	90,08	93,13	95,42	97,71	100

³¹ Fuente: Los autores.

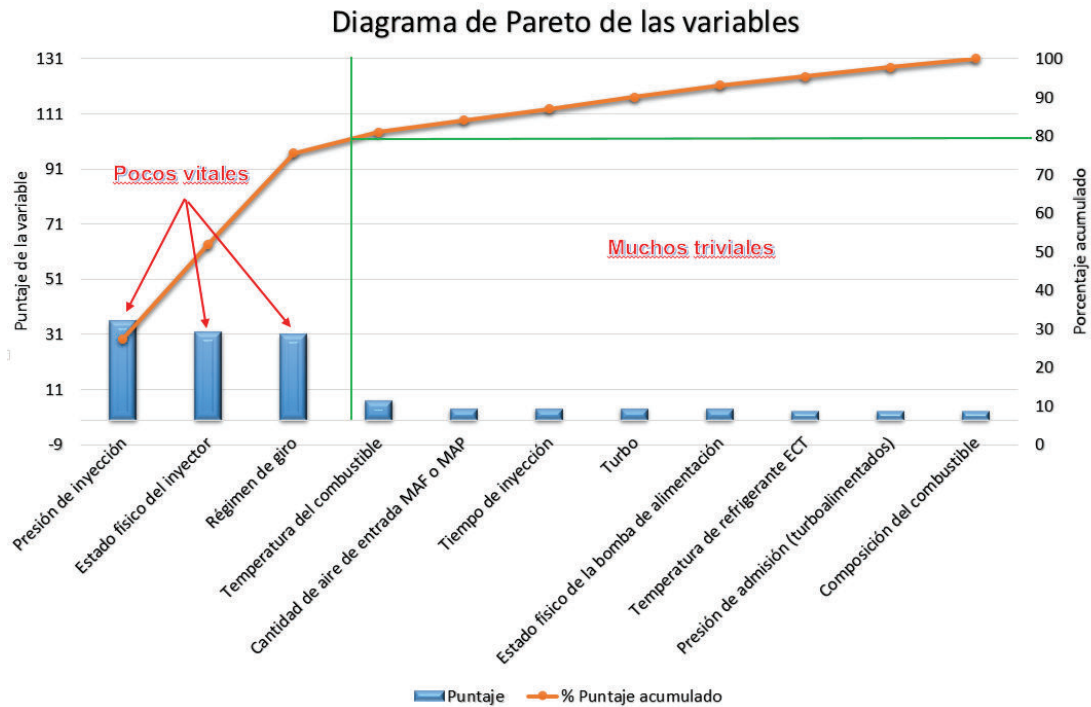


Figura 2.3. Diagrama de Pareto para determinar las variables influyentes. ³²

2.1.4.2.2 Descripción de los factores a analizar con sus niveles respectivos

Para determinar cuál es el efecto de cada factor sobre las diferentes variables de respuesta del sistema en análisis, es necesario tomar en cuenta dos niveles, entre los dos niveles se incluye un nivel intermedio. El objetivo de incluir un nivel intermedio en cada uno de los factores controlables es determinar si el comportamiento de la variable de respuesta es lineal o presenta un comportamiento de carácter polinómico. A continuación se describen los factores a analizar en el proceso, obtenidos por el método de diagrama de Pareto.

³² Fuente: Los autores.

a) Presión de inyección en el riel.

Como se trata de una variable dependiente de otros factores determinados por la ECU, es muy difícil poder establecer valores fijos para los tratamientos, por lo que se establecen los niveles mediante desviaciones a partir del valor calculado por la ECU, dichos niveles están especificados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Niveles asignados a la presión de inyección en el riel.³³

Nivel Factor	Mínimo	Central	Máximo
Variación de presión de inyección en el riel [bar]	-10	0	10

b) Estado físico del inyector

El inyector es un componente sensible a la calidad del combustible, por lo que el valor de volumen de inyección cambia acorde a su condición. Se establece los siguientes niveles para el inyector; para el primer nivel se tiene un inyector en óptimas condiciones de funcionamiento es decir que está inyectando el 100 % del volumen normal de combustible, para el segundo nivel un inyector con problemas en la tobera que está inyectando el 75,6 % y el nivel central determinado por un inyector con problemas en la tobera que está inyectando aproximadamente 87,8 %. Estos valores fueron establecidos mediante pruebas realizadas en un banco de pruebas de inyectores ubicado en los laboratorios de ingeniería mecánica automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana en la ciudad de Cuenca, el mismo que se puede apreciar en la figura 2.4.

³³ Fuente: Los autores.



Figura 2.4. Banco de pruebas de inyectores. ³⁴

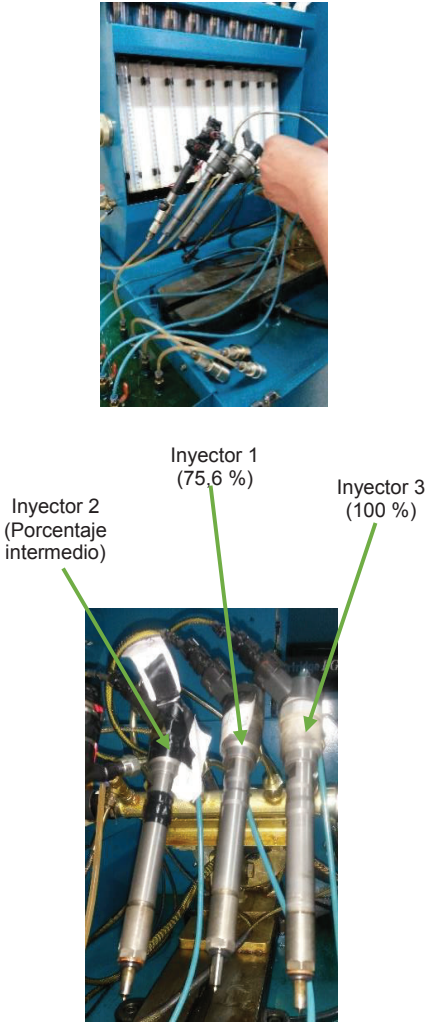
En la tabla 2.4 se realiza una breve descripción del proceso efectuado para medir el volumen de combustible que cada inyector proporciona.

Este proceso se efectuó 3 veces para establecer un promedio de los valores de volumen de inyección, que en la tabla 2.5 son especificados.

Tomando en cuenta los valores obtenidos como un promedio, se establecen los tres niveles en porcentaje del volumen de inyección de los inyectores considerando al inyector 3 como el inyector en óptimas condiciones es decir el 100 % de inyección, los niveles asignados se muestran en la tabla 2.6.

³⁴ Fuente: Los autores.

Tabla 2.4. Proceso de medición de volumen de combustible en los inyectores.³⁵

Número de proceso	Descripción del proceso	Imagen del proceso
1	Montaje de los tres inyectores a los cuales se les efectuará la prueba de volumen de inyección.	 <p>Inyector 1 (75,6 %)</p> <p>Inyector 2 (Porcentaje intermedio)</p> <p>Inyector 3 (100 %)</p>

³⁵ Fuente: Los autores.



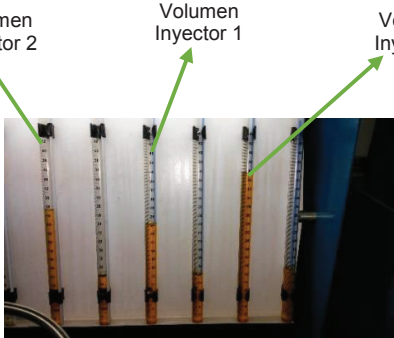
2	<p>Establecimiento de valores de los parámetros en el banco de pruebas de inyectores.</p>	
3	<p>Arranque de prueba de inyección de volumen en el banco.</p>	
4	<p>Medición de volumen de inyección de cada inyector.</p>	

Tabla 2.5. Volumen de inyección de los inyectores obtenidos en el banco de pruebas.³⁶

Prueba \ Volumen	Volumen de Inyector 1 [ml]	Volumen de Inyector 2 [ml]	Volumen de Inyector 3 [ml]
1	26,6	30,6	35
2	26,6	30,7	35,2
3	26,2	30,6	34,8
Promedio aproximado	26,46	30,7	35

Tabla 2.6. Niveles asignados al porcentaje de volumen de inyección de los inyectores.³⁷

Factor \ Nivel	Mínimo	Central	Máximo
Porcentaje de volumen de inyección [%]	75,6	87,8	100

c) Régimen de Giro

Acorde a la Norma NTE INEN 2 202 2000 Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores de diésel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre; que dicta los procedimientos para verificación de la opacidad, que es la principal variable que se altera ante el mal desempeño de un inyector, del método planteado en la norma se obtienen los niveles mínimo y máximo siendo el nivel central un punto intermedio, los mismos que se dan a conocer en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Niveles asignados al régimen de giro del motor.³⁸

Factor \ Nivel	Mínimo (ralentí)	Central	Máximo
Régimen de giro del motor [rpm]	820	1660	2500

³⁶ Fuente: Los autores.

³⁷ Fuente: Los autores.

³⁸ Fuente: Los autores.

2.1.4.2.3 Variables de respuesta

Con la ayuda de estas variables se puede analizar el efecto de los resultados de cada prueba experimental, con los diferentes parámetros preestablecidos; por lo que pueden ser características de la calidad del proceso o inclusive pueden ser variables que miden el desempeño del proceso en análisis. En la tabla 2.8 se dan a conocer las variables de respuesta establecidas para las pruebas experimentales, las mismas que fueron elegidas en función de la importancia de la adecuada descripción del fenómeno de vibración.

Tabla 2.8. Variables de respuesta.³⁹

Número	Variable de respuesta	Unidades
1	Potencia [μW]	μW
2	Asimetría	adimensional
3	Curtosis	$(\text{m/s}^2)^2$
4	Mediana	m/s^2
5	Moda	m/s^2
6	Valor RMS	m/s^2
7	Factor de Cresta	adimensional
8	Media	m/s^2
9	Varianza	$(\text{m/s}^2)^2$
10	Desviación estándar	m/s^2
11	Valor máximo	m/s^2
12	Valor mínimo	m/s^2
13	Potencia en intervalo de frecuencia	μW
14	Energía	J
15	Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	Hz
16	Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	Hz
17	Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	Hz
18	Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	Hz
19	Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	Hz
20	Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	Hz
21	Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	Hz

³⁹ Fuente: Los autores.

2.1.4.2.4 Variables controlables

Son variables del proceso experimental que se pueden fijar en un nivel dado. En la presente investigación se establecen estas variables en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Variables controlables.⁴⁰

Variable controlables	Valor
Temperatura del refrigerante (Temperatura normal de operación del motor)	92 °C
Carga externa al motor	0 %

2.1.4.2.5 Variables no controlables o de ruido

Son variables que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso. En la presente investigación se establecen estas variables en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Variables no controlables.⁴¹

Variable no controlables	Unidades
Presión atmosférica	hPa
Temperatura del ambiente	°C
Humedad relativa	%

2.1.4.3 Selección del diseño experimental

En este punto se define el diseño experimental en base a la presente investigación y las variables que entran en juego para el análisis.

No se considera un diseño factorial debido a que en este tipo de diseño experimental sólo se podrán estimar e incluir en el modelo los efectos principales e interacciones dobles; asimismo, no es posible estimar términos cuadráticos puros;

⁴⁰ Fuente: Los autores.

⁴¹ Fuente: Los autores.

por esta razón se escoge un diseño de segundo orden ya que este permite ajustar un modelo de segundo orden para así estudiar, además de los efectos lineales y de interacción, los efectos cuadráticos o de curvatura pura.

En la presente investigación se tiene tres factores a analizar por lo que se escoge el diseño de segundo orden de Box-Behnken que además es eficiente al número de corridas, es un diseño rotatable o casi rotatable, por que no incluye como tratamientos a los vértices de la región experimental.

En la representación geométrica mostrada en la figura 2.5, se nota que los puntos de este diseño se ubican en medio de las aristas del cubo centrado en el origen y, como se había señalado, no incluye los tratamientos de los vértices, como el $(1, 1, 1)$ y el $(-1, -1, -1)$ que en algunas situaciones experimentales resultan extremos y no se pueden correr. Esto hace que los tratamientos sean menos extremos que los del factorial completo 3^2 . En cualquier tratamiento del diseño de Box-Behnken al menos uno de los factores se fija en la mitad de su rango de prueba. Lo anterior también ocurre con este diseño para más factores.⁴²

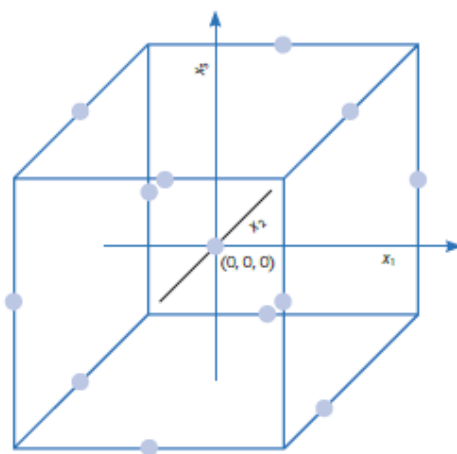


Figura 2.5. Representación geométrica del diseño de Box-Behnken.⁴³

⁴² Gutiérrez Pulido, H. & De La Vara Salazar, R. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda Edición. pp. 416-417. México. McGraw-Hill.

⁴³ Gutiérrez Pulido, H. & De La Vara Salazar, R. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda Edición. p. 417. México. McGraw-Hill.

2.1.4.4 Determinación del número de tratamientos para el experimento

Se consideran tres factores, que para el caso en estudio son: variación de presión de inyección en el riel, estado físico del inyector y régimen de giro, con los cuales se confecciona un diseño en bloques incompletos balanceados de tres factores, obteniéndose tres bloques al combinar los tratamientos, es decir $C_3^2 = 3$ bloques.

El diseño experimental para generar el modelo estimado de superficies de respuestas es el diseño de Box-Behnken, donde cada bloque posee dos tratamientos, esto se puede apreciar en la tabla 2.11.

Se combina el precedente diseño en bloques incompletos balanceados de tres factores con un diseño factorial ($2^k = 2^2 = 4$), k toma el valor de 2 ya que en cada bloque se tienen dos factores, que se coloca en la tabla 2.12 para cada uno de los bloques, donde la notación -1 representa el valor mínimo y 1 representa el valor máximo.

Tabla 2.11. Combinaciones de los factores en cada bloque. ⁴⁴

Bloque \ Factor	Variación de presión de inyección en el riel [bar]	Régimen de giro del motor [rpm]	Porcentaje de volumen de inyección [%]
Bloque 1	X	X	
Bloque 2	X		X
Bloque 3		X	X

Tabla 2.12. Diseño factorial 2^2 . ⁴⁵

X_i	X_j
-1	-1
1	-1
-1	1
1	1

⁴⁴ Fuente: Los autores.

⁴⁵ Fuente: Los autores.

Para la combinación del diseño en bloques incompletos balanceados con el diseño factorial 2^2 , se procede de la siguiente manera: las X en cada bloque se reemplazan por las dos columnas del factorial 2^2 ; se pone una columna de ceros en el espacio en blanco y, por último, se agregan tres repeticiones al centro, la notación 0 representa el valor intermedio.

El resultado de este proceso es el diseño de Box-Behnken para $k = 3$ factores, que se muestra en la tabla 2.13.

Una vez determinado el número de tratamientos es necesario establecer el número de repeticiones, definidas como correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores, las repeticiones permiten distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores, cuando no se realizan repeticiones no hay manera de estimar la variabilidad natural o el error aleatorio, lo cual dificulta la construcción de estadísticas realistas en el análisis de los datos.

Tabla 2.13. Matriz de Box-Behnken para $k = 3$. ⁴⁶

Número de tratamiento	Variación de presión de inyección en el riel [bar]	Régimen de giro del motor [rpm]	Porcentaje de volumen de inyección [%]
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

⁴⁶ Fuente: Los autores.

Para el caso en estudio en la presente investigación considerando la combinación de factores y al tener tres bloques con dos factores cada uno, se deben realizar tres repeticiones o corridas.⁴⁷

Tomando en cuenta el número de tratamientos y repeticiones obtenidas, a continuación se define el número total de tratamientos a efectuar para las pruebas experimentales, esto se logra con la ayuda del programa Minitab®, un software diseñado para efectuar funciones estadísticas básicas y avanzadas, en la tabla 2.14 se presentan los 45 tratamientos aleatorizados obtenidos con ayuda del programa, donde se puede apreciar los valores a tomar en cuenta para cada ensayo o prueba.

Tabla 2.14. Tratamientos aleatorizados para cada ensayo o prueba.⁴⁸

Número de tratamiento	Variación de Presión	RPM	Inyector	Número de tratamiento	Variación de Presión	RPM	Inyector
1	-10	820	87,8	24	0	820	75,6
2	10	820	87,8	25	0	2500	75,6
3	-10	2500	87,8	26	0	820	100
4	10	2500	87,8	27	0	2500	100
5	-10	1660	75,6	28	0	1660	87,8
6	10	1660	75,6	29	0	1660	87,8
7	-10	1660	100	30	0	1660	87,8
8	10	1660	100	31	-10	820	87,8
9	0	820	75,6	32	10	820	87,8
10	0	2500	75,6	33	-10	2500	87,8
11	0	820	100	34	10	2500	87,8
12	0	2500	100	35	-10	1660	75,6
13	0	1660	87,8	36	10	1660	75,6
14	0	1660	87,8	37	-10	1660	100
15	0	1660	87,8	38	10	1660	100
16	-10	820	87,8	39	0	820	75,6
17	10	820	87,8	40	0	2500	75,6
18	-10	2500	87,8	41	0	820	100
19	10	2500	87,8	42	0	2500	100
20	-10	1660	75,6	43	0	1660	87,8
21	10	1660	75,6	44	0	1660	87,8
22	-10	1660	100	45	0	1660	87,8
23	10	1660	100				

⁴⁷ Montgomery, D. C. 2013. *Design and analysis of experiments*. Eighth edition. p. 12. United States. John Wiley & Sons, Inc.

⁴⁸ Fuente: Los autores.

2.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS

2.2.1. CODIFICACIÓN DE TRATAMIENTOS

La codificación es importante para los tratamientos que se van a realizar, ya que con ésta se garantiza la reproducción o repetitividad del tratamiento o ensayo. Para los tratamientos a realizar, se utiliza una codificación alfa numérica basada en la norma ISO 14224 la cual es una norma internacional que brinda una base para la recolección de datos de confiabilidad y mantenimiento en un formato estándar. En la tabla 2.15 se presenta el código de un tratamiento y lo que representa cada componente del mismo.

Los 45 tratamientos con sus respectivos códigos se presentan en la tabla 2.16.

Tabla 2.15 Denominación del código de los tratamientos. ⁴⁹

EJEMPLO DE CÓDIGO: <u>CRDIMM</u> <u>0</u> <u>1660</u> <u>2</u> <u>43</u>	
a b c d e	
Componente	Denominación
a	Motor con sistema de inyección (CRDI) y los apellidos de los autores Molina Montero (MM)
b	Variación de presión (-10 bar; 0 bar; 10 bar)
c	Revoluciones por minuto (820; 1660; 2500)
d	Tipo de inyector (1=Inyector al 75.6%; 2=Inyector al 87.8%; 3=Inyector al 100%)
e	Número de tratamiento

⁴⁹ Fuente: Los autores.

Tabla 2.16 Codificación de los tratamientos. ⁵⁰

Código	Variación de Presión	RPM	Inyector
CRDIMM -10 820 2 1	-10	820	87,8
CRDIMM 10 820 2 2	10	820	87,8
CRDIMM -10 2500 2 3	-10	2500	87,8
CRDIMM 10 2500 2 4	10	2500	87,8
CRDIMM -10 1660 1 5	-10	1660	75,6
CRDIMM 10 1660 1 6	10	1660	75,6
CRDIMM -10 1660 3 7	-10	1660	100
CRDIMM-10 1660 3 8	10	1660	100
CRDIMM 0 820 1 9	0	820	75,6
CRDIMM 0 2500 1 10	0	2500	75,6
CRDIMM 0 820 3 11	0	820	100
CRDIMM 0 2500 3 12	0	2500	100
CRDIMM 0 1660 2 13	0	1660	87,8
CRDIMM 0 1660 2 14	0	1660	87,8
CRDIMM 0 1660 2 15	0	1660	87,8
CRDIMM -10 820 2 16	-10	820	87,8
CRDIMM 10 820 2 17	10	820	87,8
CRDIMM -10 2500 2 18	-10	2500	87,8
CRDIMM 10 2500 2 19	10	2500	87,8
CRDIMM -10 1660 1 20	-10	1660	75,6
CRDIMM 10 1660 1 21	10	1660	75,6
CRDIMM -10 1660 3 22	-10	1660	100
CRDIMM 10 1660 3 23	10	1660	100
CRDIMM 0 820 1 24	0	820	75,6
CRDIMM 0 2500 1 25	0	2500	75,6
CRDIMM 0 820 3 26	0	820	100
CRDIMM 0 2500 3 27	0	2500	100
CRDIMM 0 1660 2 28	0	1660	87,8
CRDIMM 0 1660 2 29	0	1660	87,8
CRDIMM 0 1660 2 30	0	1660	87,8
CRDIMM -10 820 2 31	-10	820	87,8
CRDIMM 10 820 2 32	10	820	87,8
CRDIMM -10 2500 2 33	-10	2500	87,8
CRDIMM 10 2500 2 34	10	2500	87,8
CRDIMM -10 1660 1 35	-10	1660	75,6
CRDIMM 10 1660 1 36	10	1660	75,6
CRDIMM -10 1660 3 37	-10	1660	100
CRDIMM 10 1660 3 38	10	1660	100

⁵⁰ Fuente: Los autores.

CRDIMM 0 820 1 39	0	820	75,6
CRDIMM 0 2500 1 40	0	2500	75,6
CRDIMM 0 820 3 41	0	820	100
CRDIMM 0 2500 3 42	0	2500	100
CRDIMM 0 1660 2 43	0	1660	87,8
CRDIMM 0 1660 2 44	0	1660	87,8
CRDIMM 0 1660 2 45	0	1660	87,8

2.2.2 EQUIPOS Y ELEMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este punto se describen los principales equipos y elementos de medición que se utilizaron para el desarrollo de las pruebas en la unidad experimental, que como se describió anteriormente en el punto 2.1.4.1, es un motor CRDI cuya marca comercial es Hyundai, modelo Santa Fe 2.0.

2.2.2.1 Equipo Adash® A3716

Este es un equipo de monitorización y diagnóstico por medio de señales, cuyo modelo es A3716 2U. Las principales características de este equipo se presentan en la tabla 2.17, este equipo se lo puede apreciar en la figura 2.6.

Tabla 2.17 Características técnicas de equipo Adash® A3716. ⁵¹

Descripción	Característica
Datos generales	
Número de Serie	624971
Dirección IP	192 168 1 171
Canales dinámicos	
Rango de frecuencia	25600Hz (65.5 kHz frecuencia de muestreo)
Rango dinámico	120 dB
Configuración de canal	Voltaje o ICP (individualmente para cada canal)

⁵¹ A3716 Technical Specification, ADASH LTD.

Tipo de entrada	Aceleración, velocidad, desplazamiento
Integración	Individual, doble
Filtro de paso alto	1 Hz – 12800 Hz (definición de usuario)
Filtro de paso bajo	25 Hz – 25600 Hz (definición de usuario)
Canales Tacho	
Cantidad	4 entradas independientes tacho
Rango de velocidad	0.8 Hz – 1000 Hz
Impedancia de entrada	80 kOhm
Tipo de entrada	Voltaje
Rango de entrada	+10 V (solo un rango, no hay ganancias)
Exactitud	< 0.5 %




Figura 2.6. Equipo Adash® A3716. ⁵²

2.2.2.2 Acelerómetro

El acelerómetro utilizado en la presente investigación es un acelerómetro uniaxial marca ACS; los datos técnicos se presentan en la tabla 2.18. En el anexo 2 se presenta el certificado de calibración del acelerómetro utilizado en las pruebas experimentales.

⁵² Fuente: Los autores.

Tabla 2.18 Datos técnicos del acelerómetro. ⁵³

Figura	Descripción	Característica
	Modelo ACS	3411LN
	Sensibilidad	102 mV/g
	Grado de protección	IP 67
	Fabricación	Fabricación a prueba de agua

2.2.3 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales se desarrollaron en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana de la ciudad de Cuenca en el país de Ecuador, a una altura sobre el nivel del mar de 2560 m, desde el mes de diciembre de 2014 a enero de 2015, en días laborables en el horario de 9h00 a 12h00 con el fin de que las condiciones de carácter ambiental tiendan a ser las mismas; en la tabla 2.19 se presentan las variables controlables y no controlables bajo las cuales se realizaron las pruebas.

Tabla 2.19 Variables para el desarrollo de las pruebas experimentales. ⁵⁴

	Variable	Valor
Variables controlables.	Temperatura del refrigerante (Temperatura normal de operación del motor)	92 °C
	Carga externa al motor	0 %
Variables no controlables. ⁵⁵	Presión atmosférica promedio	770 hPa
	Temperatura del ambiente promedio	17 °C
	Humedad relativa promedio	68 %

⁵³ Fuente: Los autores.

⁵⁴ Fuente: Los autores.

⁵⁵ http://www.meteored.com.ec/tiempo-en_Cuenca-America+Sur-Ecuador-Azuay--1-20244.html

2.2.3.1 Norma utilizada para las pruebas experimentales

El desarrollo de las pruebas experimentales se basa en la norma ISO 10816-6: 1995; Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 6 Reciprocating machines with power rating above 100 kW.

Esta norma especifica las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, usando mediciones realizadas en partes no giratorias y no alternativas de las máquinas en estudio. Por lo general esta norma se aplica a máquinas de movimiento alternativo del pistón montado de forma rígida o elásticamente, que responde a la necesidad presentada en este trabajo de investigación.

2.2.3.2 Protocolo de las pruebas experimentales

En la figura 2.7 se presenta el protocolo a seguir para el desarrollo de las pruebas experimentales, con el cual se garantiza la repetitividad y la reproducibilidad de las mismas.

2.2.3.3 Aislamiento entre el motor CRDI marca Hyundai, modelo Santa Fe 2.0 y el piso del laboratorio

Con el objetivo de garantizar que las muestras obtenidas durante las pruebas experimentales no se vean afectadas por la vibración existente entre el motor CRDI marca Hyundai, modelo Santa Fe 2.0 y el piso del laboratorio, considerada una variable de ruido, es necesario establecer un adecuado aislamiento entre los mismos.

Para ello se utilizó cuatro bases para el aislamiento de la vibración, estas bases fueron diseñadas y analizadas en la tesis de grado: Criollo, O. y Matute, H. (2014). *Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones*. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico Automotriz, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. (p. 33).

Estas bases son consideradas como una suspensión del tipo elástica y constan de un anti vibratorio de caucho en dos secciones y un bloque de madera como elemento central.

La validación de las bases para el aislamiento de la vibración, se realizó con el levantamiento de información experimental de desplazamiento de las bases y su transmisión a la superficie de laboratorio. Se concluyó que los resultados obtenidos demostraban que no existe un valor representativo, que denote una verdadera fuente de excitación del piso a la estructura, demostrando así que el aislamiento es adecuado para las pruebas experimentales en el motor CRDI marca Hyundai, modelo Santa Fe 2.0⁵⁶. En la figura 2.8 se puede apreciar la ubicación de las bases para el aislamiento de la vibración, y las dimensiones que poseen.

2.2.3.4 Ubicación del acelerómetro en el motor

Para asegurar que la evaluación de las medidas de vibración sea lo más uniforme posible y además que se logre la mejor comparación posible entre diferentes máquinas, la norma establece las principales puntos de medición en la estructura de la máquina, que para el caso del presente trabajo de investigación es en el motor CRDI. Estos puntos se describen en la tabla 2.20 y se especifican en las figura 2.9.

Según lo descrito anteriormente, en el motor CRDI en estudio el acelerómetro se lo ubica en el block del motor al lado izquierdo, en el punto muerto inferior del pistón, correspondiente al inyector que se desmontará acorde a la prueba experimental, según se indica en la figura 2.10.

⁵⁶ Criollo, O. y Matute, H. (2014). *Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones*. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico Automotriz, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. (p. 33).

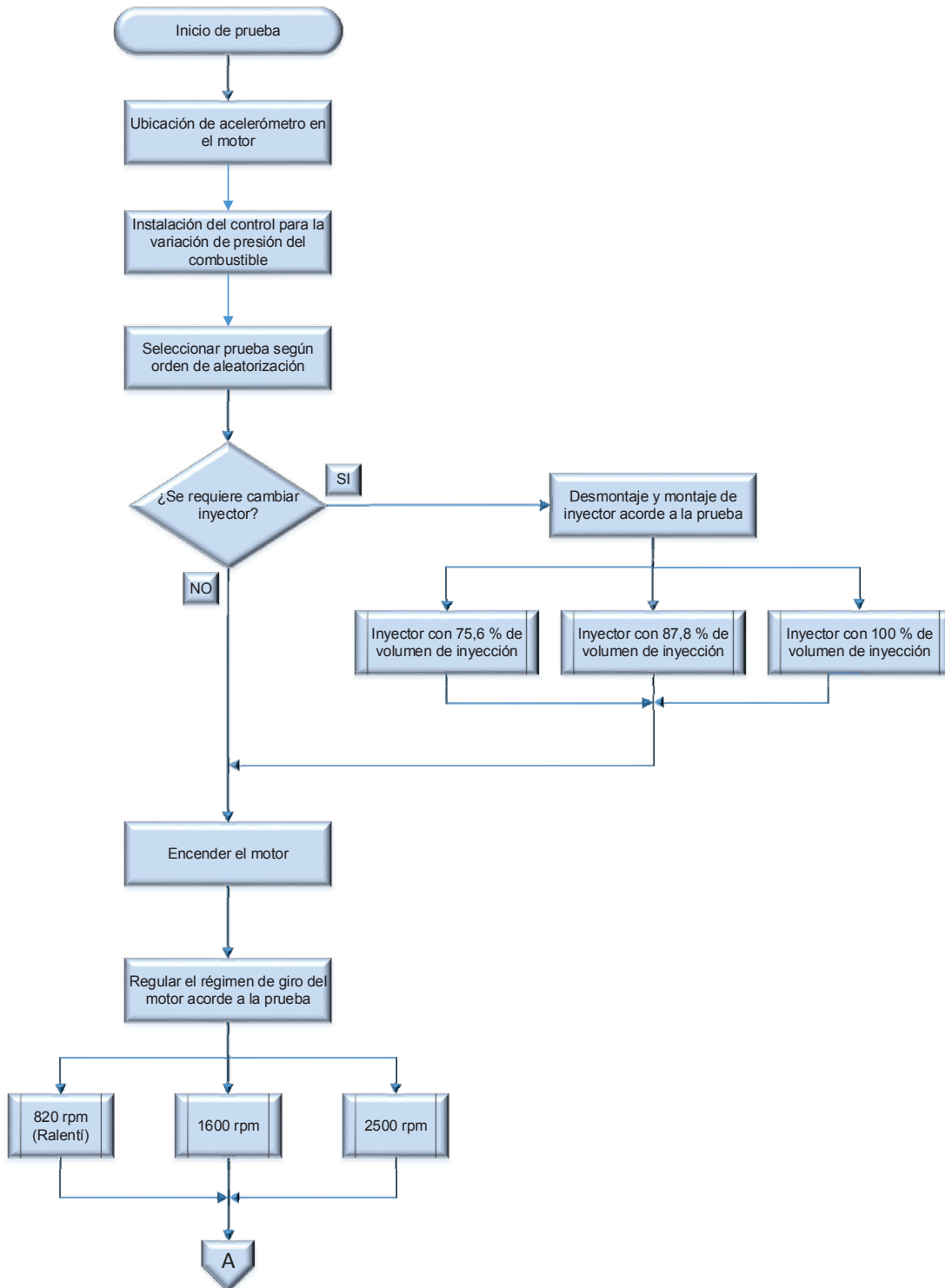


Figura. 2.7. Protocolo para realizar las pruebas experimentales.⁵⁷

⁵⁷ Fuente: Los autores.

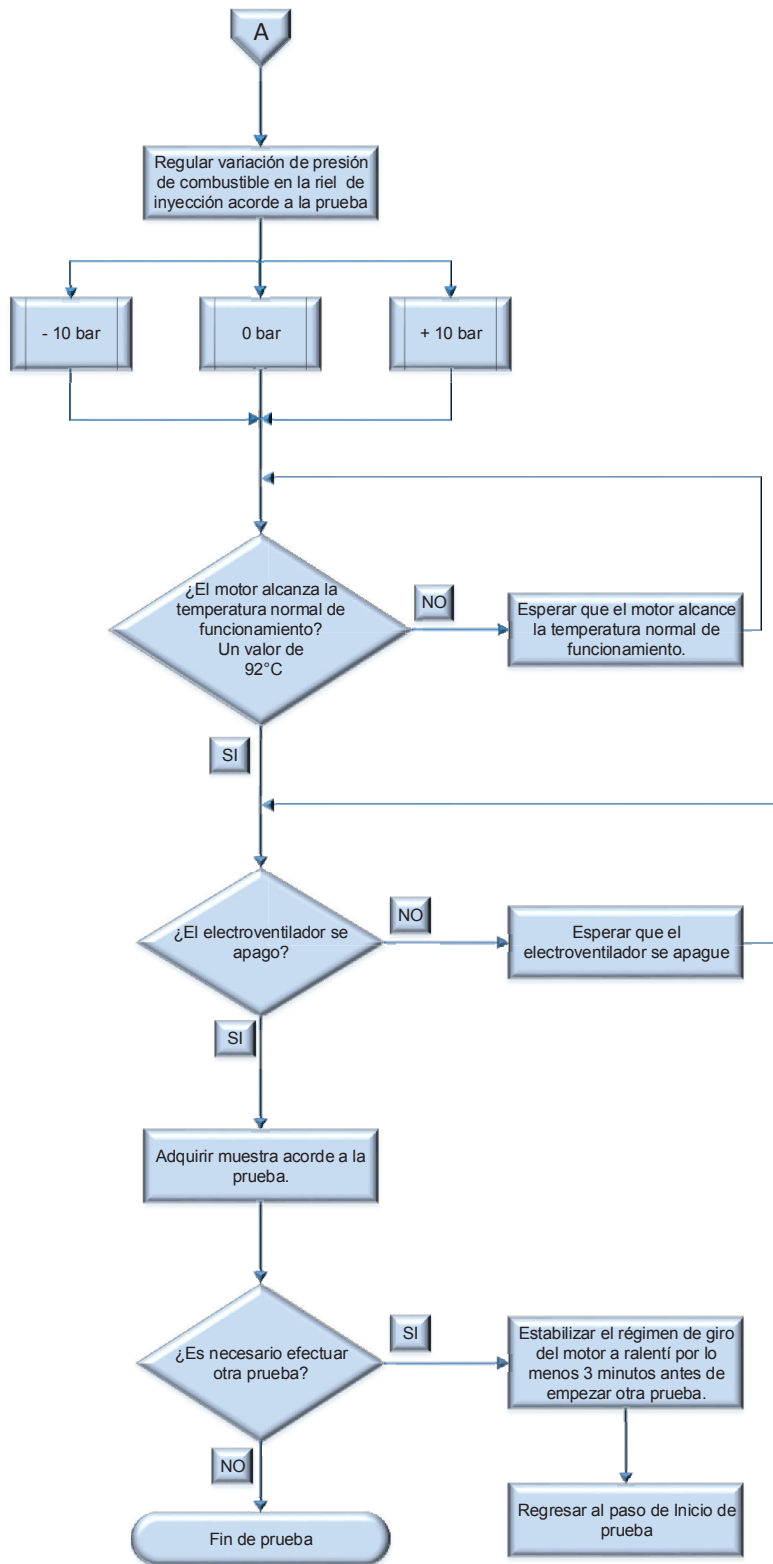


Figura. 2.7. Protocolo para realizar las pruebas experimentales. (Continuación)

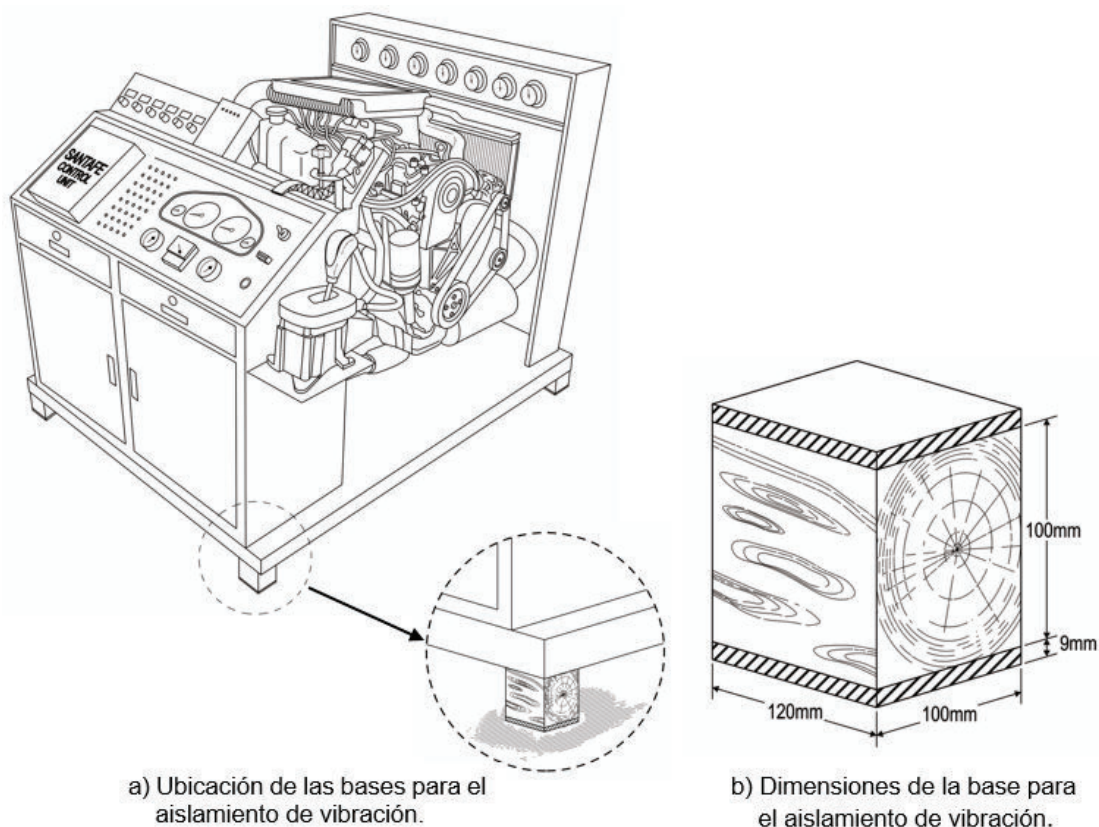


Figura 2.8. Bases para el aislamiento de la vibración. ⁵⁸

Tabla 2.20 Descripción de los puntos de medida de la figura 2.9. ⁵⁹

Denominación	Sigla	Descripción
Lados de medición	L	A mano izquierda, enfrente del borde de acoplamiento
	R	A mano derecha, enfrente del borde de acoplamiento
Niveles de medición	1	Extremo de la máquina, en el borde de acoplamiento
	2	A nivel del cigüeñal
	3	Borde superior de la estructura
Puntos de medición relacionados con la longitud de la máquina	.1	Extremo de acoplamiento
	.2	A mitad de la longitud de la máquina
	.3	Extremo libre de la máquina

⁵⁸ Fuente: Los autores.

⁵⁹ International Standard. (1995, Diciembre 15). ISO 10816-6, *Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW*.

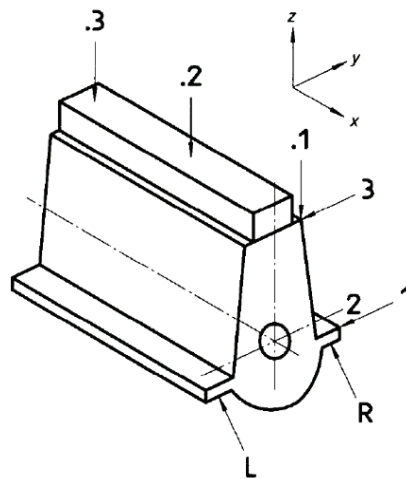


Figura 2.9. Puntos de medición en un motor vertical en línea.⁶⁰

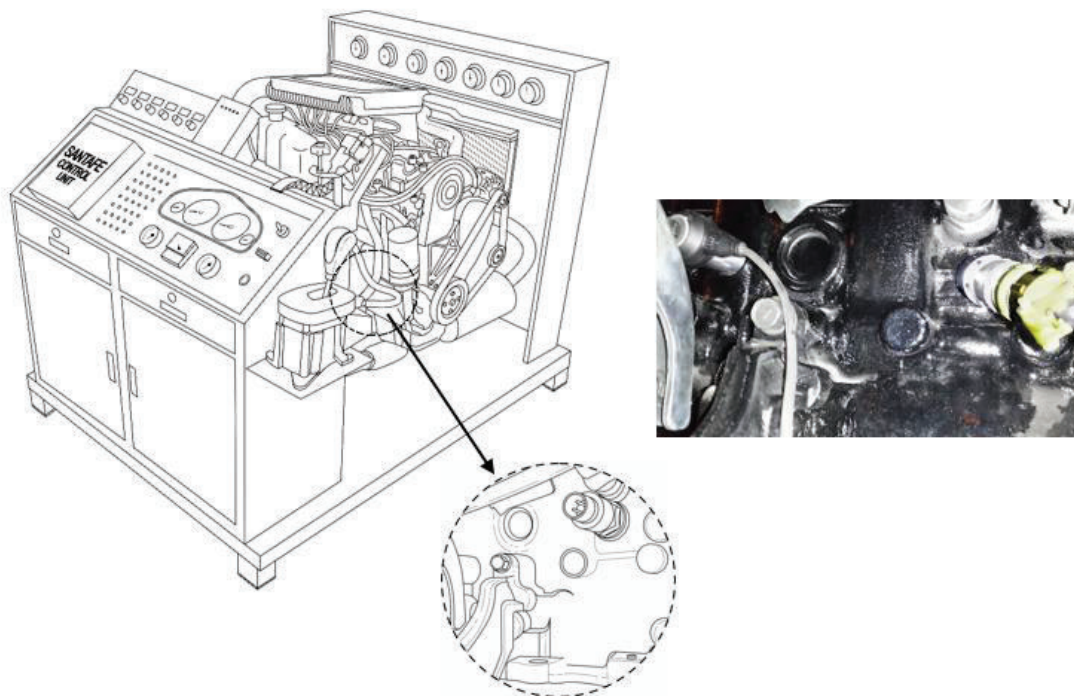


Figura 2.10. Ubicación del acelerómetro en el motor.⁶¹

⁶⁰ International Standard. (1995, Diciembre 15). *ISO 10816-6, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW.*

⁶¹ Fuente: Los autores.

2.2.3.5 Inyectores utilizados en la prueba experimental

Para las pruebas experimentales se utilizaron tres inyectores los cuales se diferencian por el volumen de inyección de combustible que cada uno entrega. En el punto 2.1.4.2.2 en el literal b se estableció los volúmenes de inyección en porcentaje determinados para estos inyectores. En la figura 2.11 se muestran los tres inyectores utilizados en las pruebas experimentales.



Figura 2.11. Inyectores utilizados en las pruebas experimentales.⁶²

⁶² Fuente: Los autores.

2.2.3.6 Regulación del régimen de giro del motor

Para controlar y regular el régimen de giro, el motor CRDI en estudio cuenta con un pedal acelerador con el cual se puede establecer los tres niveles que se definieron en el punto 2.1.4.2.2 literal c. El pedal acelerador y su ubicación en el motor se muestran en la figura 2.12.

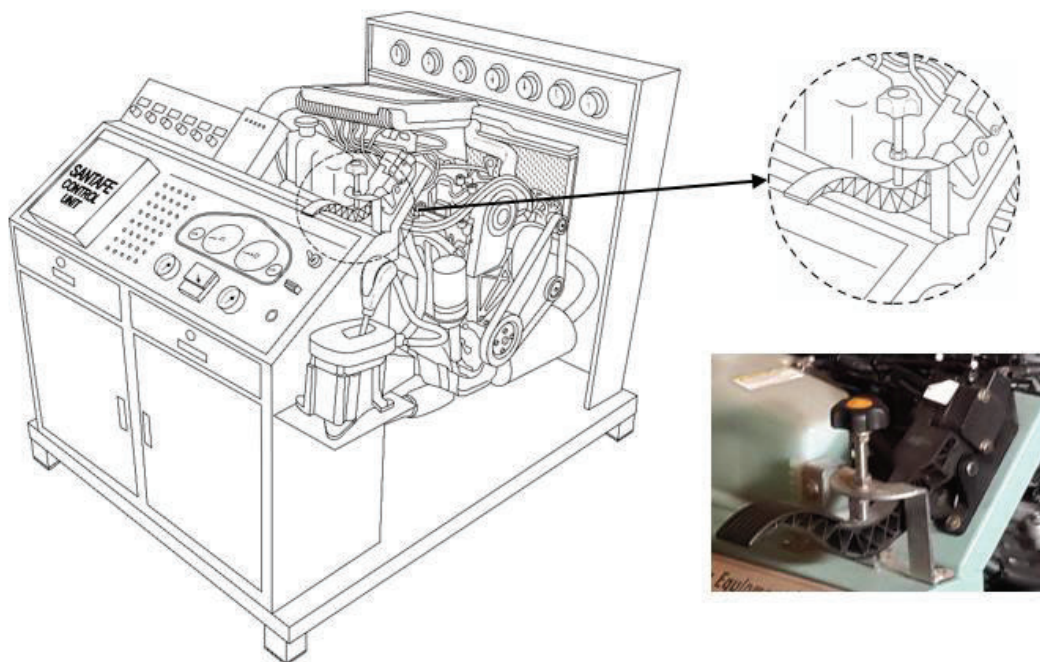


Figura 2.12. Ubicación del pedal acelerador en el motor. ⁶³

El valor de las revoluciones por minuto que se obtenían al regular con el pedal acelerador, eran observadas a través del escáner como se puede apreciar en la figura 2.13.

⁶³ Fuente: Los autores.

Nombre	Valor	Unidad	MIN	MAX
<input checked="" type="checkbox"/> VELOCIDAD DE MOTOR	818	rpm	818.0	822.0

Nombre	Valor	Unidad	MIN	MAX
<input checked="" type="checkbox"/> VELOCIDAD DE MOTOR	818	rpm	818.0	822.0
<input checked="" type="checkbox"/> TEMP REFRIGER SENSOR	93.3	°C	93.3	93.7
<input checked="" type="checkbox"/> PRESIÓN DE COMBUSTIBLE	320.8	bar	318.0	324.5
<input checked="" type="checkbox"/> VENT-VEL BAJA	OFF	-	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> CANTIDAD COMBUSTIBLE	7.2	ccc	7.2	7.3

Figura 2.13. Visualización de rpm en escáner. ⁶⁴

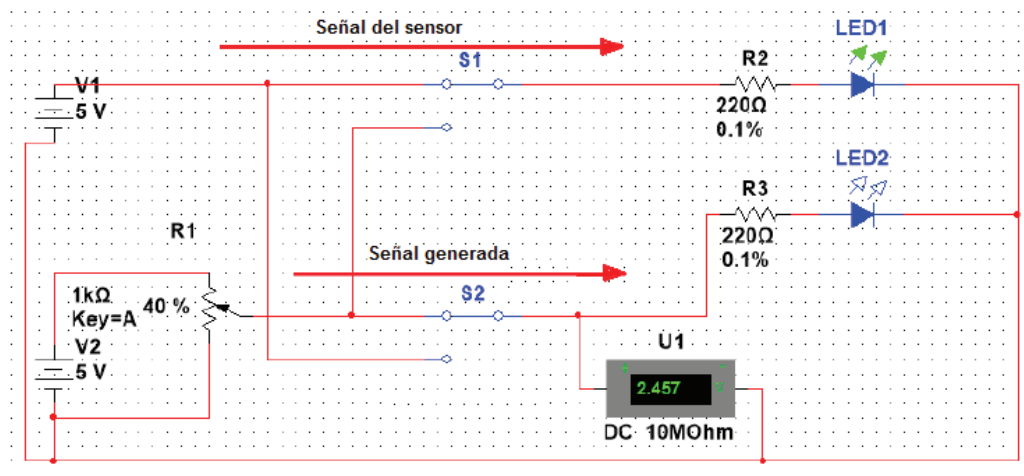
2.2.3.7 Sistema de control de variación de presión de combustible en el riel

El sistema de control de variación de presión de combustible en el riel, se realizó mediante un circuito que permite la variación de la presión interceptando la señal del sensor de presión en el riel (RPS) y enviando una nueva señal a la ECU y de esta manera se logra variar la presión del combustible en el riel en más 10 bares y menos 10 bares. El circuito de control de variación de presión en el riel que se muestra en la figura 2.14 literal a, presenta un voltaje V1 el mismo que representa la señal dada por el sensor de presión en el riel (RPS) hacia la unidad de control del motor (ECU), la cual está representada por el LED1; en la figura también se aprecia el voltaje generado por el usuario, representado por V2, que pasa por un potenciómetro, permitiendo así la variación de voltaje, este voltaje va hacia un LED2. Al activarse los relés representados en la figura 2.14 literal a por S1 y S2, se intercambian las señales del sensor RPS y la generada por el usuario lo cual se puede apreciar en la figura 2.14 literal b, esta última es enviada a la ECU, variando así el voltaje que permite el control de variación de presión de combustible en el riel.

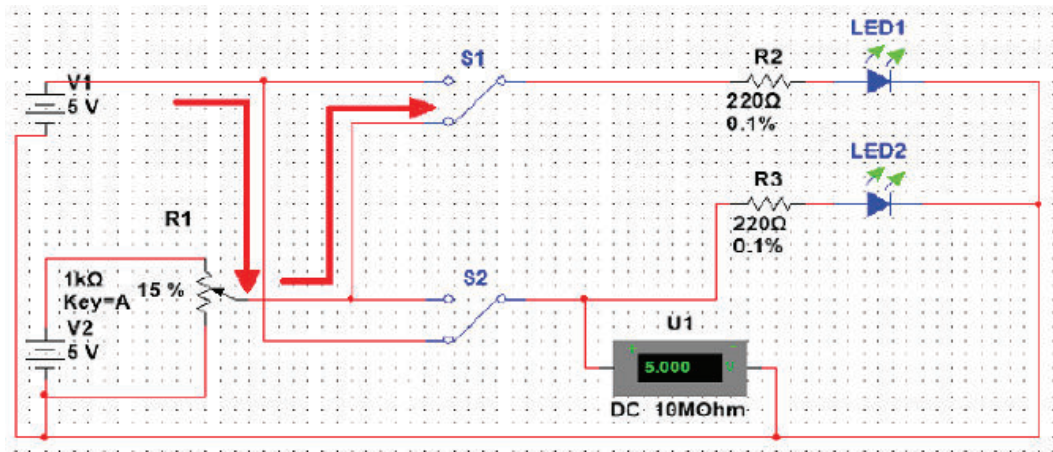
Es necesario controlar los voltajes en el circuito, tanto el generado por el usuario como el determinado por el sensor RPS, esto se logra ingresándolos por medio de una placa ARDUINO® que se muestra en la figura 2.15, a un programa efectuado en Simulink en el programa Matlab®, verificando de esta forma que el voltaje que

⁶⁴ Fuente: Los autores.

llega a la ECU genere la variación de presión requerida para la prueba experimental.



a) Condición normal de funcionamiento



b) Señales intercambiadas

Figura 2.14. Circuito para la variación de presión de combustible.⁶⁵

⁶⁵ Fuente: Los autores.

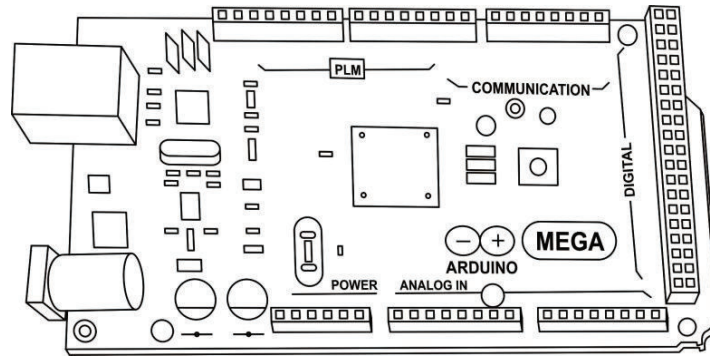


Figura 2.15. Tarjeta ARDUINO®.⁶⁶

En la figura 2.16 se muestra el programa realizado en Simulink de Matlab®, en el cual, los pines 7 y 8 representan la señal de voltaje del sensor RPS y la señal del voltaje generado por el usuario respectivamente, los cuales se dirigen a la ECU, sus valores se pueden observar en sus respectivas pantallas de visualización. La ECU calcula el valor de la presión en función de los voltajes que recibe, dichos valores se pueden apreciar en las pantallas de visualización de presión definida por RPS y visualización de presión generada por usuario.

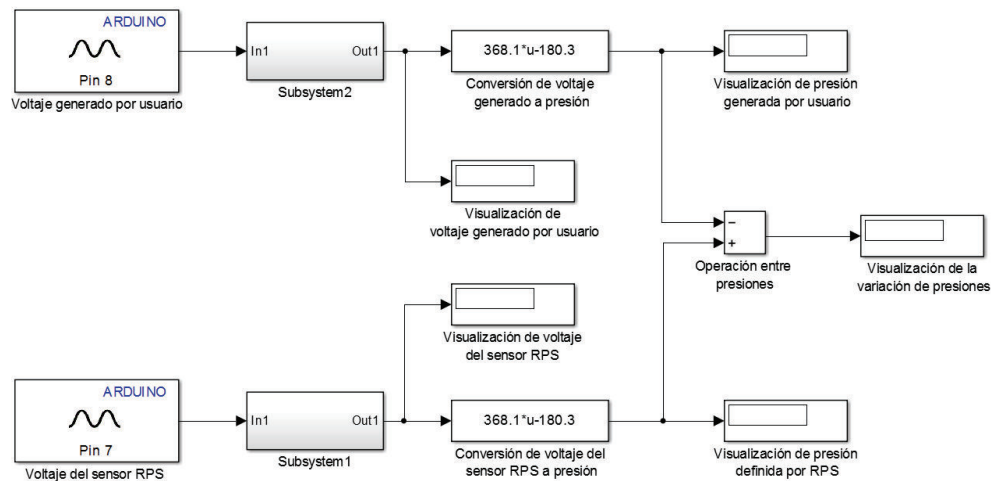


Figura 2.16. Programa en Simulink para el control de los voltajes.⁶⁷

⁶⁶ Fuente: Los autores.

⁶⁷ Fuente: Los autores.

En la figura 2.17 se puede apreciar al sensor RPS y su socket respectivo, además de la conexión realizada hacia el circuito para la variación de presión de combustible en el riel.



Figura 2.17. Conexión en el sensor RPS para el circuito de variación de presión de combustible en el riel.⁶⁸

⁶⁸ Fuente: Los autores.

En la figura 2.18 se muestra el funcionamiento del sistema de control de variación de presión de combustible en el riel, además la conexión existente entre el circuito para la variación de presión de combustible en el riel y la tarjeta ARDUINO® que son parte del sistema de control.

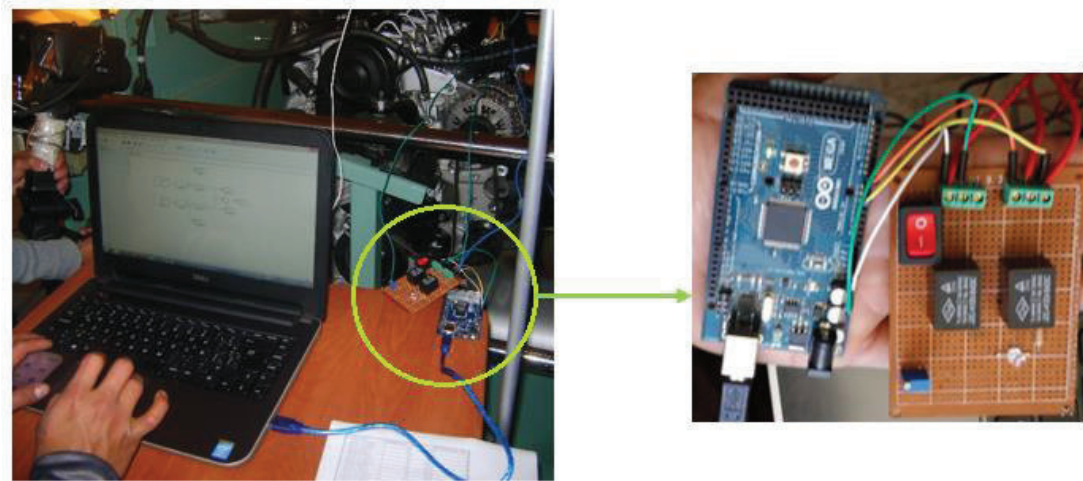


Figura 2.18. Funcionamiento del sistema de control de variación de presión de combustible en el riel. ⁶⁹

2.2.3.8 Adquisición de muestra acorde a la prueba experimental

Para determinar el tamaño de la muestra de la señal de vibración, se procede a analizar el valor que toman las variables de salida de la señal de aceleración del motor en condiciones normales de operación a un régimen de giro de 820 rpm, aplicando diferentes tamaños de muestra.

Para tal efecto se analiza el valor normalizado de las variables de salida respecto del valor que adoptan, cuando se tiene una muestra de longitud infinita como se muestra en la ecuación (2.1), para el ejemplo del cálculo del valor normalizado del RMS.

⁶⁹ Fuente: Los autores.

$$RMS_N = \frac{RMS_{\infty} - RMS_i}{RMS_{\infty}} \quad (2.1)$$

Se puede apreciar en la figura 2.19 que el valor de las variables de salida se estabilizan dentro de una banda de tolerancia de $\pm 1\%$ cuando la duración de la muestra se aproxima a 5 segundos.

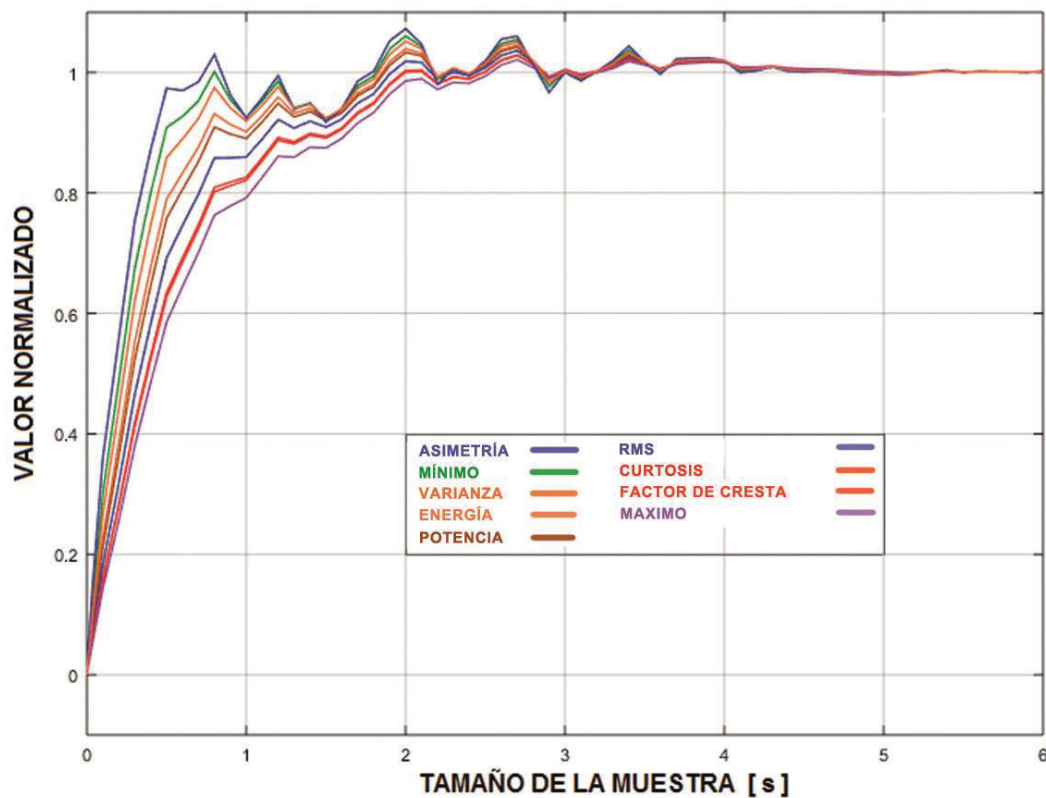


Figura 2.19. Estabilización de los valores de las variables de salida.⁷⁰

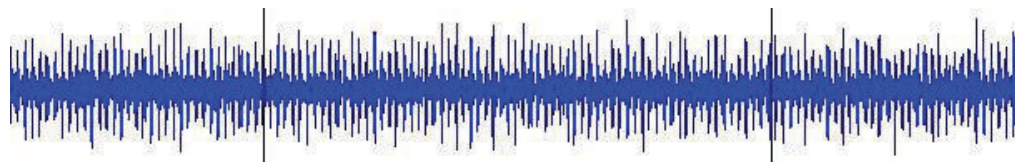
Por lo anteriormente expuesto, para la toma de cada una de las muestras se utiliza un intervalo de tiempo de 5 segundos, con una frecuencia de muestreo de 65536

⁷⁰ Fuente: Los autores.

Hz, obteniendo un total de 327680 muestras, cada tratamiento se almacena en formato .wav, esto se puede ver en la figura 2.20.



a) Frecuencia de muestreo y tiempo de muestra



b) Señal de vibración en aceleración con respecto al tiempo

Figura 2.20. Adquisición de muestra acorde a la prueba experimental. ⁷¹

2.2.3.9 Disposición general de los equipos para el desarrollo de las pruebas experimentales

En este punto se da a conocer la disposición general de los equipos para el desarrollo de las pruebas experimentales en el motor CRDI marca Hyundai, modelo Santa Fe 2.0, con el objetivo de adquirir las señales de vibración en formato .wav de acuerdo a cada una de los 45 tratamientos establecidos, esta disposición se la puede ver en la figura 2.21.

⁷¹ Fuente: Los autores.

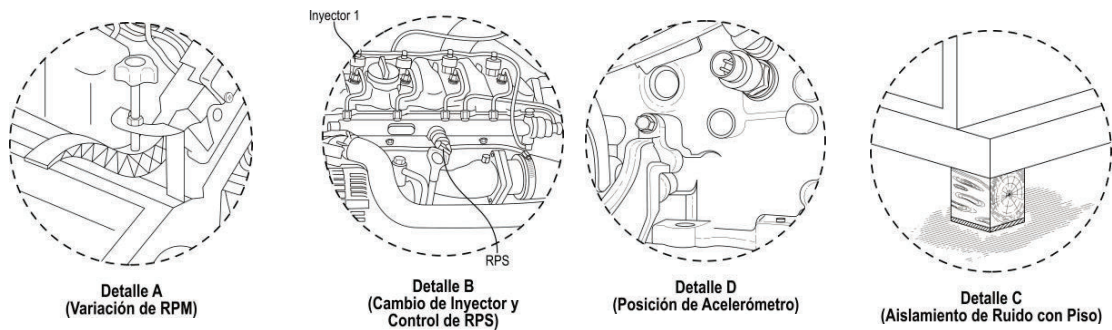
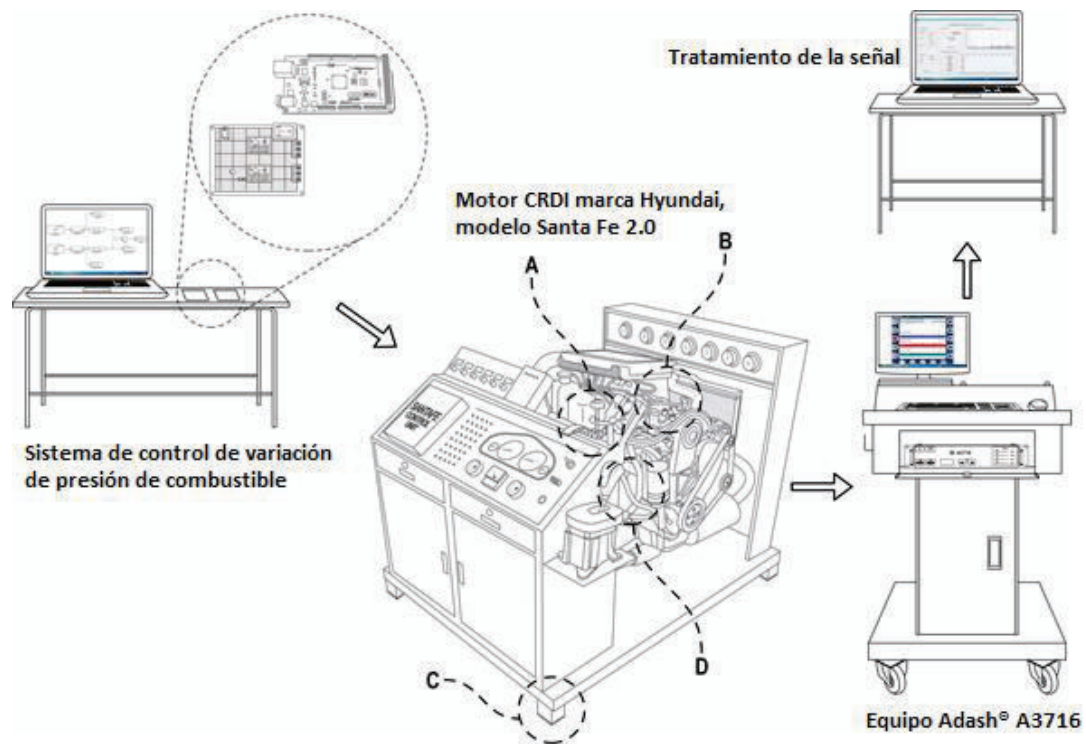


Figura 2.21. Disposición general de los equipos para el desarrollo de las pruebas experimentales.⁷²

⁷² Fuente: Los autores.

2.3 TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES OBTENIDAS, POR MEDIO DE UN ALGORITMO GENERADO EN EL SOFTWARE MATEMÁTICO MATLAB®

2.3.1 TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES

Una vez obtenidas las señales de cada prueba experimental, estas se almacenan en el equipo Adash® A3716, para posteriormente proceder a realizar el tratamiento de las señales por medio de un algoritmo generado en el software Matlab®.

Las señales de vibraciones obtenidas en cada prueba experimental tienen su dominio en el tiempo, y están cargadas de mucha información por lo cual resulta imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos. Para poder realizar un análisis de vibraciones es necesario que las señales se puedan observar en el dominio de la frecuencia, obteniendo la gráfica de amplitud versus frecuencia que es conocida con el nombre de espectro, el proceso de pasar de dominio del tiempo a dominio de frecuencia se lo realiza con la ayuda de la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual es una técnica para calcular la frecuencia de las series que conforman la onda en el dominio del tiempo.

El algoritmo generado para el tratamiento de señales del presente proyecto en el software Matlab®, utiliza la transformada rápida de Fourier, el proceso del tratamiento de la señal se puede apreciar en la figura 2.22, y se lo describe a continuación: a partir de la señal capturada en el equipo Adash® A3716 que es una señal compleja (en color verde), se calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo (en color azul) que contiene la señal compleja y por último se las muestra en forma individual en el dominio de la frecuencia (en color rojo).

En la figura 2.23 se muestra el algoritmo generado en el software Matlab® para el correspondiente tratamiento de señales del presente proyecto, mientras que en la figura 2.24 se muestra un esquema que indica el proceso que realiza el algoritmo generado.

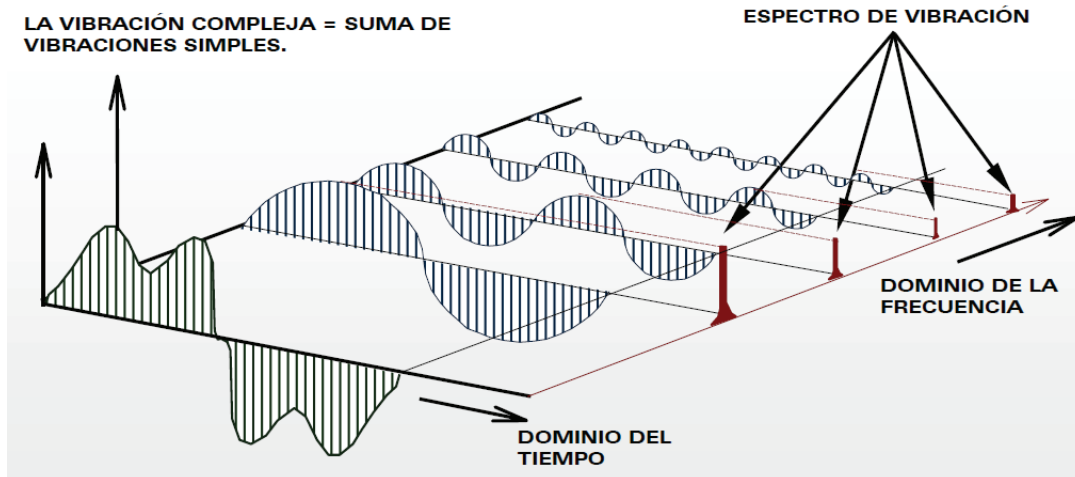


Figura 2.22. Señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia (Espectro).⁷³

```
Xsig = fft(xsig(:,ch),NFFT)/L;           %Trasformada de Fourier (FFT)
f1 = fSampling/2*(linspace(0,1,NFFT/2+1));
F(:,1)=f1;
F(:,2)=2*abs(Xsig(1:NFFT/2+1));
MAXFRE=max(F(:,2)) ;                   %% se obtiene el máximo pico de frecuencia

    % para enviar la señal En el Tiempo al workspace
assignin('base','SEspectro',F);        % para enviar la señal en el FFT al workspace

if b<7
Color=[mod(b,2) mod(fix(b/2),2) mod(fix(fix(b/2)/2),2)];
end
if b>=7
Color=[mod((b-7),2)*0.5 mod(fix((b-7)/2),2)*0.5 mod(fix(fix((b-7)/2)/2),2)*0.5];
end

axes(handles.axes4);
plot(F(:,1),F(:,2)/MAXFRE); % para normalizar la grafica dividir F(:,2) para MAXFRE
grid on; axis([-10 600 0 1]);
set(handles.axes4,'ButtonDownFcn',@axes4_ButtonDownFcn)
```

Figura 2.23. Algoritmo generado en el software Matlab® de la FFT.⁷⁴

⁷³ A-MAQ S.A.; 2005; Análisis de Maquinaria, *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*, p. 14.

⁷⁴ Fuente: Los autores.

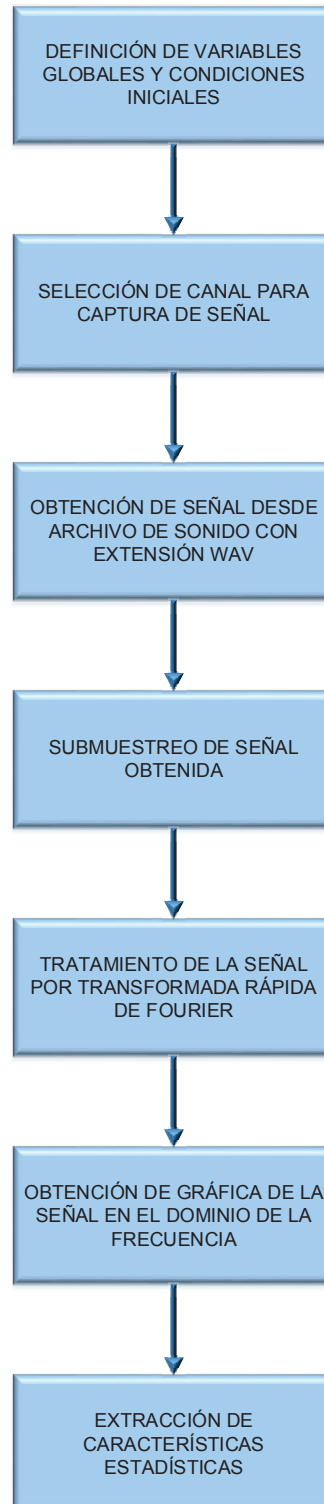


Figura 2.24. Esquema del proceso que realiza el algoritmo generado en Matlab®.⁷⁵

⁷⁵ Fuente: Los autores.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS EN EL TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES

Al procesar las señales de aceleración por medio del algoritmo generado en el software Matlab®, se obtienen diferentes características representativas de cada señal, conocidas como variables de respuesta, las cuales se dieron a conocer en la tabla 2.8, las primeras 14 variables presentadas en dicha tabla se obtienen de la señal de aceleración adquirida, mientras que las variables de respuesta desde la 15 a la 21 corresponden a características obtenidas en el dominio de la frecuencia, todas las características obtenidas son necesarias para realizar un análisis estadístico completo referente a las variables de respuesta más influyentes con respecto al diagnóstico de fallas ocasionadas por variación de volumen de combustible en los inyectores del motor de combustión interna alternativo a diésel.

En la figura 2.25 se muestra la sección del algoritmo generado en el software Matlab® para el cálculo de las características representativas del presente proyecto.

```

***** SE EXTRAE CARACTERISTICAS ESTADISTICAS *****

CARACTERISTICAS(1,b)= sum(abs(xsig(:,ch)).^2)/length(xsig(:,ch))*1000000;
CARACTERISTICAS(2,b)= skewness(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(3,b)= kurtosis(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(4,b)= median(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(5,b)= mode(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(6,b)= rms(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(7,b)= max(xsig(:,ch))/rms(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(8,b)= mean(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(9,b)= var(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(10,b)= std(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(11,b)=max(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(12,b)= min(xsig(:,ch));
CARACTERISTICAS(13,b)= bandpower(xsig(:,ch),Fs,handles.edit3)*1000000;
CARACTERISTICAS(14,b)= sum((abs(xsig(:,ch)).^2));

***** SE GENERA INFORMACION DE FRECUENCIA *****

CARACTERISTICAS(15,b)=Ordenado1(1,2)/PasoFrec+FLimiteI; % Frecuencia donde se encuentra el pico max

```

Figura 2.25. Algoritmo generado en el software Matlab® de las características representativas.⁷⁶

⁷⁶ Fuente: Los autores.

A continuación se enuncian las definiciones de algunas variables de respuesta a ser analizadas.

a) Potencia⁷⁷

Se la define como la energía por unidad de tiempo en un determinado intervalo, según el número total de muestras.

$$P = \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} \sum_{i=N_1}^{N_2} X_i^2 \quad (2.2)$$

b) Curtosis⁷⁸

Es el "cuarto momento" normalizado de la señal, es una representación matemática de la desviación de una distribución de amplitudes de la distribución de amplitudes del tipo de la distribución de Gauss.

$$C = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

c) Valor RMS⁷⁹

El valor RMS de una señal de vibración es una medida importante de su amplitud y es numéricamente igual a la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda.

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}} \quad (2.4)$$

⁷⁷ Soliman, S. & Srinath, M. 1999. *Señales y Sistemas Continuos y Discretos*. Segunda Edición. p.286. España. Prentice Hall.

⁷⁸ White, G. 2010. *Introducción al Análisis de Vibraciones*. p. 93. USA.

⁷⁹ Marín, E. P. 2007. *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. Quinta Edición. p. 54. Cuba.

d) Factor de cresta CF^{80}

Es un factor importante para el diagnóstico de maquinarias y estructuras y es el cociente entre el valor Pico y el valor RMS.

$$CF = \frac{Y_{PICO}}{Y_{RMS}} \quad (2.5)$$

e) Energía⁸¹

El valor de energía de una señal simboliza la energía disipada por una resistencia de 1 ohm al aplicarle un voltaje equivalente a la señal de aceleración.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} X_i^2 \quad (2.6)$$

En la figura 2.26 se presenta la interfaz gráfica correspondiente a la caracterización de las señales, espectro y filtro, obtenida en el software Matlab®, que se utiliza para el procesamiento de las señales.

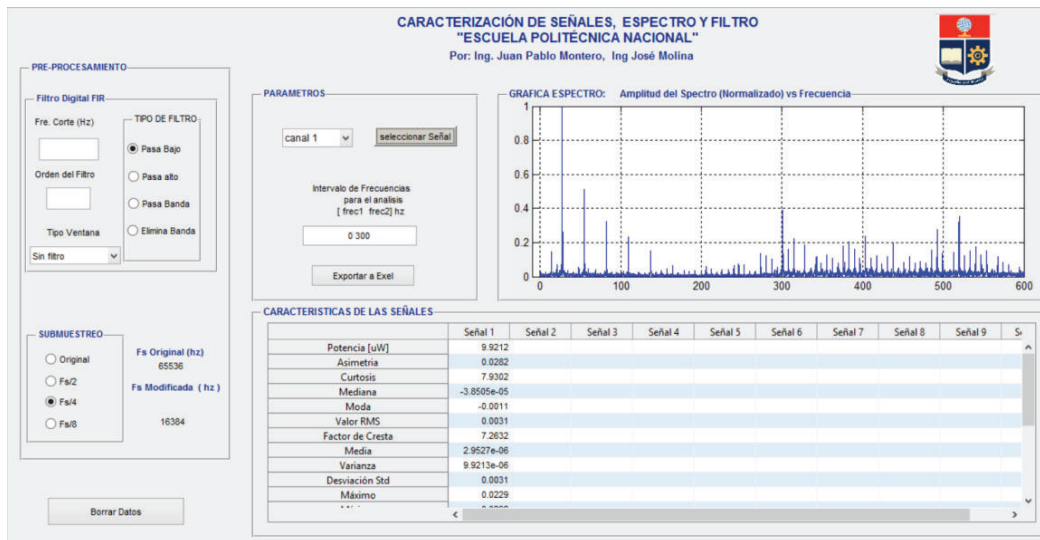


Figura 2.26. Pantalla de caracterización de señales, espectro y filtro. ⁸²

⁸⁰ Marín, E. P. 2007. *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. Quinta Edición. p. 37. Cuba.

⁸¹ Soliman, S. & Srinath, M. 1999. *Señales y Sistemas Continuos y Discretos*. Segunda Edición. p.286. España. Prentice Hall.

⁸² Fuente: Los autores.

Adicionalmente se realizó un algoritmo en el software matemático Matlab®, con el objetivo de comparar los espectros de los tratamientos realizados bajo condiciones normales de funcionamiento, con los espectros de los tratamientos relacionados con los que presentan fallas del inyector o variación de presión de combustible a un determinado régimen de funcionamiento del motor. En la figura 2.27 se presenta la pantalla en la cual se puede apreciar la comparación de dos espectros, correspondientes a dos tratamientos diferentes con ayuda del software adicional.

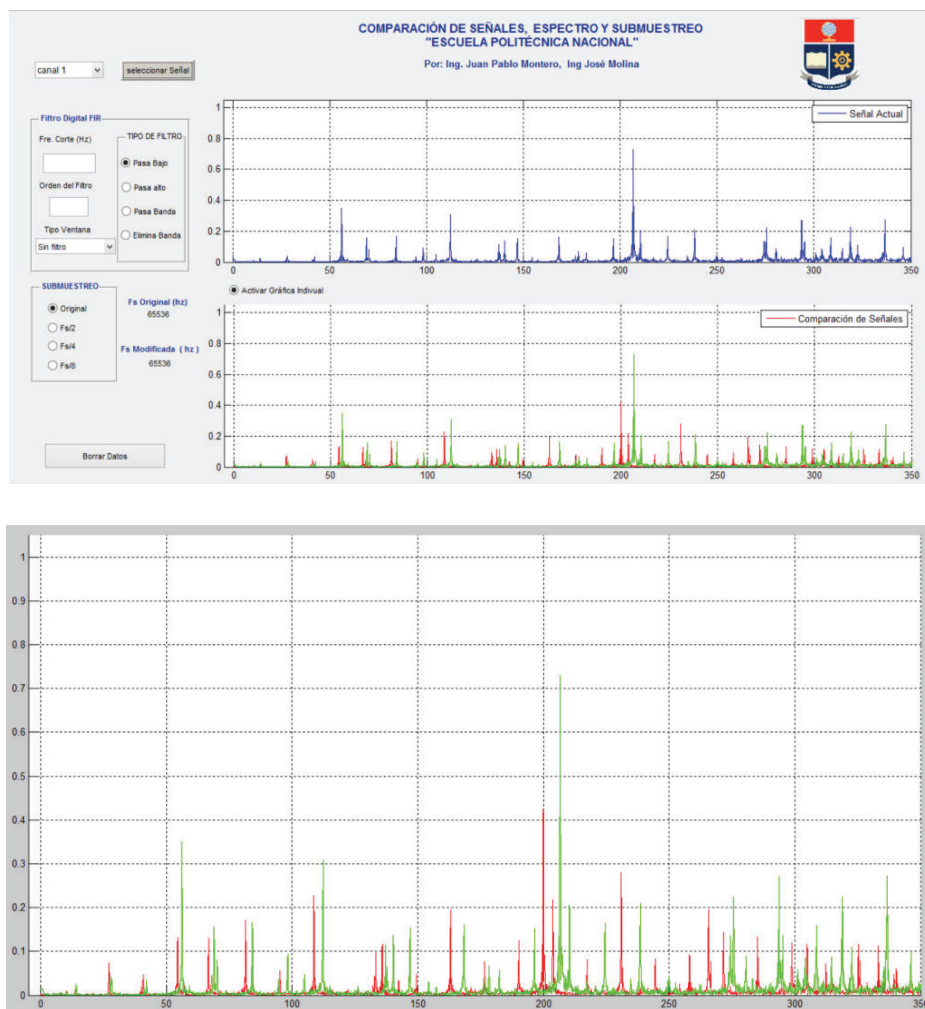


Figura 2.27. Pantalla de comparación de señales.⁸³

⁸³ Fuente: Los autores.

En la tabla 2.21 se muestra todos los valores de las variables de respuesta según el tratamiento de la señal, obtenidos con el algoritmo generado en el software Matlab®.

Tabla 2.21 Valores de las variables de respuesta características.⁸⁴

Código	Variación de Presión	RPM	Inyector	POTENCIA [μ w]	ASIMETRIA	CURTOSIS	MEDIANA	MODA
CRDIMM -10 820 2 1	-10	820	87,8	9,921205352	0,0282372	7,93020916	-3,8505E-05	-0,00114965
CRDIMM 10 820 2 2	10	820	87,8	9,636517876	-0,0281307	8,71450927	-3,3259E-05	-0,0005548
CRDIMM -10 2500 2 3	-10	2500	87,8	676,5359689	-0,02116042	15,7245164	-8,9407E-07	-0,01134527
CRDIMM 10 2500 2 4	10	2500	87,8	507,4612627	0,49789143	7,44415935	-0,0003919	0,00886786
CRDIMM -10 1660 1 5	-10	1660	75,6	149,4267041	0,0400715	4,01205661	-3,8326E-05	-0,00121248
CRDIMM 10 1660 1 6	10	1660	75,6	36,39393798	0,0266144	8,20534245	-1,7881E-06	0,00182915
CRDIMM -10 1660 3 7	-10	1660	100	160,7128906	0,05897797	3,74126974	-0,00012082	-0,00105476
CRDIMM 10 1660 3 8	10	1660	100	20,26772066	-0,00216036	4,99011853	3,4928E-05	0,0011059
CRDIMM 0 820 1 9	0	820	75,6	14,38916602	-0,06712305	9,66066474	-4,9472E-06	-0,00039113
CRDIMM 0 2500 1 10	0	2500	75,6	386,7886868	0,4913064	7,78706668	-0,00029588	0,00243855
CRDIMM 0 820 3 11	0	820	100	11,62152387	0,03580405	8,67177357	-2,5094E-05	-0,00043583
CRDIMM 0 2500 3 12	0	2500	100	542,5973184	0,02577013	17,4946097	4,3273E-05	-0,00847948
CRDIMM 0 1660 2 13	0	1660	87,8	58,66366723	0,00430518	5,66219154	1,0133E-06	-0,00011253
CRDIMM 0 1660 2 14	0	1660	87,8	54,19400657	-0,04350205	5,37073188	1,6689E-06	0,00078976
CRDIMM 0 1660 2 15	0	1660	87,8	55,87468883	-0,0205258	5,38342519	1,955E-05	-0,00029171
CRDIMM -10 820 2 16	-10	820	87,8	12,09330046	-0,05968885	8,03213235	-2,4676E-05	-0,00022745
CRDIMM 10 820 2 17	10	820	87,8	9,641990568	-0,02723248	8,42270999	-2,8133E-05	0,00070465
CRDIMM -10 2500 2 18	-10	2500	87,8	502,158871	-0,05527038	18,7323198	3,618E-05	-0,0193392
CRDIMM 10 2500 2 19	10	2500	87,8	532,2971751	0,51045527	7,71125047	-0,00034183	-0,01459479
CRDIMM -10 1660 1 20	-10	1660	75,6	150,0813756	0,02916714	3,89019182	-8,5235E-05	-0,00311697
CRDIMM 10 1660 1 21	10	1660	75,6	33,1536865	-0,02228332	7,32124309	1,8299E-05	0,00049961
CRDIMM -10 1660 3 22	-10	1660	100	176,543291	0,05304519	3,8226852	-5,275E-05	-0,01057041
CRDIMM 10 1660 3 23	10	1660	100	26,52207591	-0,00588658	5,66825795	5,2452E-06	0,0008235
CRDIMM 0 820 1 24	0	820	75,6	14,91416978	-0,11833047	10,1443662	-6,3181E-06	0,00034153
CRDIMM 0 2500 1 25	0	2500	75,6	446,9796904	0,59459875	9,68907702	-0,00031137	0,00238681
CRDIMM 0 820 3 26	0	820	100	11,45976765	0,0313	8,74694916	-2,5868E-05	-0,00045288
CRDIMM 0 2500 3 27	0	2500	100	472,4898231	0,01635759	18,9104965	-2,7359E-05	0,00978589
CRDIMM 0 1660 2 28	0	1660	87,8	47,42210867	-0,0365724	4,46297081	3,6061E-05	0,00347853
CRDIMM 0 1660 2 29	0	1660	87,8	49,90720241	-0,04953501	4,77068575	3,9339E-05	0,00043464
CRDIMM 0 1660 2 30	0	1660	87,8	48,94963272	-0,03648224	4,49248216	3,0518E-05	-0,00072646
CRDIMM -10 820 2 31	-10	820	87,8	11,49511991	-0,05540727	7,85015126	-2,6524E-05	-0,00015199
CRDIMM 10 820 2 32	10	820	87,8	10,06661504	-0,01389093	8,25744147	-1,9968E-05	-0,00086427
CRDIMM -10 2500 2 33	-10	2500	87,8	645,0248115	0,04293887	14,5281259	-4,0233E-05	-0,00876713
CRDIMM 10 2500 2 34	10	2500	87,8	479,6074683	0,61252153	9,43852026	-0,00042945	-0,0134933
CRDIMM -10 1660 1 35	-10	1660	75,6	151,0241712	0,01355583	3,77528775	-6,4194E-05	0,00024414
CRDIMM 10 1660 1 36	10	1660	75,6	41,12938817	-0,07738763	8,52392723	6,5565E-06	-0,00227594
CRDIMM -10 1660 3 37	-10	1660	100	176,5495062	0,04151658	3,56383944	-9,7334E-05	-0,0112772
CRDIMM 10 1660 3 38	10	1660	100	24,23333626	-0,04012373	5,39222118	2,6226E-06	0,00060678
CRDIMM 0 820 1 39	0	820	75,6	15,09425741	-0,09472609	10,7775941	8,4043E-06	-9,2149E-05
CRDIMM 0 2500 1 40	0	2500	75,6	557,2473803	0,44982238	6,65372221	-0,00037867	-0,02351415
CRDIMM 0 820 3 41	0	820	100	11,07646872	0,04070956	8,6036463	-2,9087E-05	-0,00020242
CRDIMM 0 2500 3 42	0	2500	100	564,7705849	0,06792624	16,7926946	7,0691E-05	-0,01206064
CRDIMM 0 1660 2 43	0	1660	87,8	170,8166344	0,03615033	3,87857012	-0,00011218	-0,00015295
CRDIMM 0 1660 2 44	0	1660	87,8	186,7418697	0,04756412	3,80558895	-0,00011414	-0,00322092
CRDIMM 0 1660 2 45	0	1660	87,8	190,9794345	0,05336954	3,73367496	-0,00010103	-0,00822461

⁸⁴ Fuente: Los autores.

Tabla 2.21 (continuación) Valores de las variables de respuesta características.

Código	VALOR RMS	FACTOR DE CRESTA	MEDIA	VARIANZA	DESV ST	MÁXIMO	MÍNIMO
CRDIMM -10 820 2 1	0,00314979	7,26323359	2,9527E-06	9,9213E-06	0,00314981	0,02287769	-0,02324259
CRDIMM 10 820 2 2	0,00310427	7,62703113	-1,2664E-06	9,6366E-06	0,00310429	0,0236764	-0,02610672
CRDIMM -10 2500 2 3	0,02601031	13,8402837	-2,5623E-05	0,00067654	0,02601045	0,35999	-0,37136972
CRDIMM 10 2500 2 4	0,0225269	8,24516291	-9,284E-06	0,00050747	0,02252704	0,18573797	-0,1409831
CRDIMM -10 1660 1 5	0,01222402	5,58153798	1,8315E-06	0,00014943	0,0122241	0,06822884	-0,06174755
CRDIMM 10 1660 1 6	0,00603274	13,6685997	-1,073E-05	3,6394E-05	0,00603277	0,08245909	-0,06070471
CRDIMM -10 1660 3 7	0,01267726	5,08315637	3,1321E-07	0,00016071	0,01267734	0,06444049	-0,05844641
CRDIMM 10 1660 3 8	0,00450197	6,02305041	5,6057E-06	2,0268E-05	0,00450199	0,02711558	-0,02659106
CRDIMM 0 820 1 9	0,00379331	8,06529058	-5,412E-06	1,4389E-05	0,00379332	0,03059411	-0,0313884
CRDIMM 0 2500 1 10	0,01966694	8,09415014	7,3441E-06	0,00038679	0,01966706	0,1591872	-0,12145984
CRDIMM 0 820 3 11	0,00340904	8,85636387	4,0783E-06	1,1622E-05	0,00340905	0,03019166	-0,0296483
CRDIMM 0 2500 3 12	0,02329372	16,2632832	1,672E-05	0,0005426	0,02329385	0,37883234	-0,36416602
CRDIMM 0 1660 2 13	0,00765922	6,62824364	8,7706E-06	5,8664E-05	0,00765926	0,05076718	-0,0588783
CRDIMM 0 1660 2 14	0,00736166	5,66166805	1,2034E-05	5,4195E-05	0,00736169	0,04167926	-0,05091715
CRDIMM 0 1660 2 15	0,00747494	6,53353714	-3,7986E-06	5,5875E-05	0,00747498	0,04883778	-0,04874051
CRDIMM -10 820 2 16	0,00347754	8,26652804	-2,5999E-06	1,2093E-05	0,00347756	0,0287472	-0,02902484
CRDIMM 10 820 2 17	0,00310516	8,18026548	-6,4448E-07	9,6421E-06	0,00310517	0,025401	-0,03311396
CRDIMM -10 2500 2 18	0,0224089	15,6849079	1,7578E-06	0,00050216	0,02240904	0,35148156	-0,36220407
CRDIMM 10 2500 2 19	0,02307157	8,22906259	-8,5163E-06	0,0005323	0,02307171	0,18985736	-0,14762628
CRDIMM -10 1660 1 20	0,01225077	5,45783654	-4,6423E-06	0,00015008	0,01225084	0,0668627	-0,05418766
CRDIMM 10 1660 1 21	0,00575792	8,71518808	-3,1612E-06	3,3154E-05	0,00575796	0,05018139	-0,07127869
CRDIMM -10 1660 3 22	0,01328696	4,86375745	-1,1826E-07	0,00017655	0,01328704	0,06462455	-0,06028914
CRDIMM 10 1660 3 23	0,00514996	5,89014337	5,4741E-06	2,6522E-05	0,00514999	0,030334	-0,03623617
CRDIMM 0 820 1 24	0,00386189	9,65348819	8,3308E-06	1,4914E-05	0,0038619	0,03728068	-0,04586744
CRDIMM 0 2500 1 25	0,02114189	9,40199046	-4,2197E-06	0,00044699	0,02114202	0,19877589	-0,1388756
CRDIMM 0 820 3 26	0,00338523	9,23057978	-3,1571E-06	1,146E-05	0,00338525	0,03124762	-0,02723336
CRDIMM 0 2500 3 27	0,02173683	16,3957619	-1,3471E-05	0,0004725	0,02173696	0,35639191	-0,36540496
CRDIMM 0 1660 2 28	0,00688637	5,92190338	-1,2017E-06	4,7423E-05	0,00688641	0,04078043	-0,04091322
CRDIMM 0 1660 2 29	0,0070645	5,88781764	3,5719E-06	4,9908E-05	0,00706455	0,04159451	-0,04655695
CRDIMM 0 1660 2 30	0,0069964	5,43921665	8,1814E-06	4,895E-05	0,00699644	0,03805494	-0,04251814
CRDIMM -10 820 2 31	0,00339045	7,0746869	3,3121E-06	1,1495E-05	0,00339046	0,02398634	-0,02446795
CRDIMM 10 820 2 32	0,00317279	8,12520873	1,1314E-06	1,0067E-05	0,00317281	0,0257796	-0,02884626
CRDIMM -10 2500 2 33	0,02539734	13,5145305	-5,6128E-06	0,00064503	0,02539749	0,34323311	-0,3685323
CRDIMM 10 2500 2 34	0,02189994	9,57591154	1,3922E-05	0,00047961	0,02190007	0,20971191	-0,14730763
CRDIMM -10 1660 1 35	0,01228919	5,84795549	-8,5617E-07	0,00015103	0,01228926	0,07186663	-0,05729628
CRDIMM 10 1660 1 36	0,00641322	11,2944003	-9,1606E-06	4,113E-05	0,00641325	0,07243347	-0,07134283
CRDIMM -10 1660 3 37	0,01328719	4,86403968	-2,4038E-07	0,00017655	0,01328727	0,06462944	-0,05597842
CRDIMM 10 1660 3 38	0,00492274	6,20081292	1,655E-06	2,4234E-05	0,00492277	0,03052497	-0,03426671
CRDIMM 0 820 1 39	0,00388513	11,3186653	1,0615E-05	1,5094E-05	0,00388514	0,04397452	-0,03294158
CRDIMM 0 2500 1 40	0,02360609	7,93323106	1,5263E-05	0,00055725	0,02360623	0,18727255	-0,14873707
CRDIMM 0 820 3 41	0,00332813	8,95126434	-2,5977E-06	1,1077E-05	0,00332815	0,029791	-0,03367817
CRDIMM 0 2500 3 42	0,0237649	14,0092182	1,7007E-05	0,00056478	0,02376504	0,3329277	-0,32782614
CRDIMM 0 1660 2 43	0,01306968	5,68272666	1,2628E-06	0,00017082	0,01306976	0,07427144	-0,06400633
CRDIMM 0 1660 2 44	0,01366535	5,16116224	1,6087E-06	0,00018674	0,01366544	0,0705291	-0,0683018
CRDIMM 0 1660 2 45	0,01381953	5,16205822	-4,4756E-07	0,00019098	0,01381962	0,07133722	-0,06028426

Tabla 2.21 (continuación) Valores de las variables de respuesta características.

Código	POT INT FREC [μw]	ENERGÍA [J]	FRECUENCIA PICO PRIN	FRECUENCIA PICO 2	FRECUENCIA PICO 3	FRECUENCIA PICO 4	FRECUENCIA PICO 5
CRDIMM -10 820 2 1	0,080313381	0,81274514	27,49958039	54,87416269	82,12374689	109,4983292	136,8729115
CRDIMM 10 820 2 2	0,079613542	0,78942354	26,62459374	52,24920274	12,87480355	86,37368204	290,3705693
CRDIMM -10 2500 2 3	0,683159872	55,4218266	216,8716908	130,1230145	106,6233731	238,4963608	260,246029
CRDIMM 10 2500 2 4	0,064313448	41,5712266	84,74870684	169,3724156	104,1234112	253,9961243	127,1230603
CRDIMM -10 1660 1 5	0,606629284	12,2410356	63,49903108	126,748066	190,122099	95,12354853	77,87381174
CRDIMM 10 1660 1 6	0,091819713	2,9813914	25,74960709	203,1219006	66,99897768	52,12420465	161,7475319
CRDIMM -10 1660 3 7	0,594342871	13,1656	63,2490349	126,2480736	189,3721104	94,74855425	77,49881746
CRDIMM 10 1660 3 8	0,217698015	1,66033168	48,24926377	96,37352946	144,6227932	84,37371256	36,24944688
CRDIMM 0 820 1 9	0,032115879	1,17876048	27,49958039	82,12374689	136,8729115	109,4983292	63,49903108
CRDIMM 0 2500 1 10	0,038406848	31,6857292	84,24871447	168,2474327	126,2480736	252,3711491	103,4984207
CRDIMM 0 820 3 11	0,078676578	0,95203524	27,49958039	54,87416269	82,12374689	109,4983292	136,8729115
CRDIMM 0 2500 3 12	0,599731068	44,4495723	210,8717824	126,6230679	103,7484169	231,99646	189,7471047
CRDIMM 0 1660 2 13	0,09216663	4,80572762	205,4968644	55,87414743	195,2470208	83,7487221	111,6232968
CRDIMM 0 1660 2 14	0,097304231	4,43957302	204,996872	55,62415124	166,9974518	68,2489586	139,2478752
CRDIMM 0 1660 2 15	0,131507651	4,57725451	206,7468453	56,24914171	112,3732853	293,7455178	238,6213589
CRDIMM -10 820 2 16	0,069125013	0,99068317	27,49958039	54,87416269	82,24874498	287,3706151	109,4983292
CRDIMM 10 820 2 17	0,069512196	0,78987187	28,37456704	53,12418939	85,62369349	12,87480355	114,7482491
CRDIMM -10 2500 2 18	0,431920737	41,1368547	207,74683	124,6230984	102,1234417	249,2461968	83,12373163
CRDIMM 10 2500 2 19	0,06933053	43,6057846	84,74870684	169,3724156	253,9961243	127,1230603	104,1234112
CRDIMM -10 1660 1 20	0,562997942	12,2946663	62,49904634	125,2480889	187,6221371	93,74856951	76,74882891
CRDIMM 10 1660 1 21	0,087919114	2,71595	92,99858095	179,9972535	44,3743229	106,2483788	58,49910737
CRDIMM -10 1660 3 22	0,581030025	14,4624264	62,99903871	125,8730793	188,872118	94,49855807	251,7461587
CRDIMM 10 1660 3 23	0,217810687	2,17268846	51,74921037	104,1234112	90,87361338	156,3726139	38,87440682
CRDIMM 0 820 1 24	0,027941426	1,22176879	27,49958039	136,8729115	82,24874498	206,1218548	106,1233807
CRDIMM 0 2500 1 25	0,063053912	36,6165762	84,24871447	168,4974289	126,3730717	252,6211453	210,6217862
CRDIMM 0 820 3 26	0,07461712	0,93878417	27,49958039	54,87416269	81,24876024	108,6233425	296,3704777
CRDIMM 0 2500 3 27	0,322102896	38,7063663	208,4968186	125,1230908	83,49872591	102,498436	249,9961854
CRDIMM 0 1660 2 28	0,359485381	3,88481914	56,49913789	112,8732777	207,4968338	169,2474175	281,7457009
CRDIMM 0 1660 2 29	0,369214851	4,08839802	56,62413598	208,1218243	169,6224118	113,1232739	98,9984894
CRDIMM 0 1660 2 30	0,379896714	4,00995391	56,3741398	207,3718358	112,6232815	168,9974213	294,6205044
CRDIMM -10 820 2 31	0,069617946	0,94168022	27,49958039	54,87416269	82,12374689	287,3706151	109,4983292
CRDIMM 10 820 2 32	0,069024789	0,8246571	28,37456704	56,62413598	85,74869158	12,87480355	289,6205807
CRDIMM -10 2500 2 33	0,577467971	52,8404326	216,9966889	130,3730107	106,8733692	238,746357	195,2470208
CRDIMM 10 2500 2 34	0,062991876	39,2894438	84,24871447	168,4974289	126,3730717	103,6234188	252,6211453
CRDIMM -10 1660 1 35	0,58369455	12,3719001	62,62404443	125,1230908	187,6221371	297,1204663	93,8735676
CRDIMM 10 1660 1 36	0,104396811	3,36931948	199,621954	55,62415124	8,499870302	177,1222973	111,7482949
CRDIMM -10 1660 3 37	0,60293249	14,4629355	63,2490349	126,4980698	189,6221066	94,87355234	110,623312
CRDIMM 10 1660 3 38	0,21577648	1,98519491	51,37421609	102,6234341	87,74866106	154,4976426	247,6212216
CRDIMM 0 820 1 39	0,029971911	1,23652157	27,49958039	82,12374689	109,4983292	54,87416269	136,7479134
CRDIMM 0 2500 1 40	0,062954932	45,6497054	83,7487221	102,8734303	167,3724461	250,9961701	125,4980851
CRDIMM 0 820 3 41	0,068605128	0,90738432	27,49958039	54,87416269	82,24874498	109,4983292	136,8729115
CRDIMM 0 2500 3 42	0,418960115	46,2660063	211,6217709	126,9980622	190,4970932	232,7464486	84,74870684
CRDIMM 0 1660 2 43	0,577508086	13,9932987	63,2490349	126,4980698	189,6221066	94,87355234	77,62381555
CRDIMM 0 1660 2 44	0,579929398	15,297894	63,2490349	126,4980698	189,6221066	94,87355234	77,62381555
CRDIMM 0 1660 2 45	0,566466494	15,6450353	63,37403299	126,4980698	189,7471047	94,99855044	77,74881365

Tabla 2.21 (continuación) Valores de las variables de respuesta características.

Código	FRECUENCIA PICO 6	FRECUENCIA PICO 7
CRDIMM -10 820 2 1	13,74979019	273,6208249
CRDIMM 10 820 2 2	111,998291	269,8708821
CRDIMM -10 2500 2 3	173,4973526	31,12452508
CRDIMM 10 2500 2 4	211,746769	190,4970932
CRDIMM -10 1660 1 5	158,4975815	253,496132
CRDIMM 10 1660 1 6	178,8722706	297,6204587
CRDIMM -10 1660 3 7	157,747593	252,3711491
CRDIMM 10 1660 3 8	289,3705846	59,37409402
CRDIMM 0 820 1 9	155,3726292	182,7472115
CRDIMM 0 2500 1 10	210,2467919	189,2471123
CRDIMM 0 820 3 11	13,74979019	287,3706151
CRDIMM 0 2500 3 12	84,37371256	283,8706685
CRDIMM 0 1660 2 13	222,8715992	274,2458153
CRDIMM 0 1660 2 14	271,4958573	236,6213894
CRDIMM 0 1660 2 15	68,99894716	275,7457925
CRDIMM -10 820 2 16	136,8729115	273,6208249
CRDIMM 10 820 2 17	137,7478981	298,8704396
CRDIMM -10 2500 2 18	228,3715153	166,1224652
CRDIMM 10 2500 2 19	211,746769	190,6220913
CRDIMM -10 1660 1 20	250,1211835	296,9954682
CRDIMM 10 1660 1 21	196,6219998	15,87475777
CRDIMM -10 1660 3 22	298,8704396	157,3725987
CRDIMM 10 1660 3 23	248,7462044	293,995514
CRDIMM 0 820 1 24	273,6208249	54,87416269
CRDIMM 0 2500 1 25	189,4971085	103,6234188
CRDIMM 0 820 3 26	282,6206876	134,9979401
CRDIMM 0 2500 3 27	291,8705464	229,7464943
CRDIMM 0 1660 2 28	225,3715611	98,74849322
CRDIMM 0 1660 2 29	277,4957658	84,87370493
CRDIMM 0 1660 2 30	276,495781	225,246563
CRDIMM -10 820 2 31	273,6208249	136,8729115
CRDIMM 10 820 2 32	114,8732472	104,1234112
CRDIMM -10 2500 2 33	260,3710271	59,62409021
CRDIMM 10 2500 2 34	210,6217862	189,4971085
CRDIMM -10 1660 1 35	76,873827	156,3726139
CRDIMM 10 1660 1 36	127,4980545	40,49938203
CRDIMM -10 1660 3 37	77,62381555	252,7461434
CRDIMM 10 1660 3 38	286,1206341	211,9967652
CRDIMM 0 820 1 39	153,747654	126,3730717
CRDIMM 0 2500 1 40	209,1218091	188,2471276
CRDIMM 0 820 3 41	287,3706151	206,371851
CRDIMM 0 2500 3 42	104,1234112	253,9961243
CRDIMM 0 1660 2 43	158,1225872	232,7464486
CRDIMM 0 1660 2 44	252,8711415	158,1225872
CRDIMM 0 1660 2 45	252,9961396	158,1225872

CAPÍTULO 3

ESPECTROS CARACTERÍSTICOS DE LAS FALLAS DE FUNCIONAMIENTO POR VARIACIÓN DE VOLUMEN DE COMBUSTIBLE EN LOS INYECTORES

3.1 DEFINICIÓN DE PATRONES DE VIBRACIÓN EN CONDICIONES DE OPERACIÓN NORMAL

Para establecer el adecuado intervalo de frecuencia para el análisis de los espectros, se consideró que las principales frecuencias excitadas por máquinas reciprocantes son generalmente encontradas en el rango de frecuencia de 2 a 300 Hz⁸⁵, por lo tanto se considera que el intervalo más adecuado para el análisis de los espectros en la presente investigación es de 0 a 300 Hz.

Para el análisis del espectro patrón se debe considerar la frecuencia fundamental del espectro (X), la cual representa una vuelta del cigüeñal y está relacionada con el régimen de giro del motor, además se debe considerar a los submúltiplos y múltiplos pares de la frecuencia fundamental, por lo tanto se plantean las siguientes relaciones con los elementos mecánicos referidos al mecanismo de la distribución del motor, que se encuentran directamente relacionados con el intercambio de gases del proceso de combustión y giro del motor:

- El giro del cigüeñal provocado por un pistón que se encuentra en combustión está asociada a la frecuencia fundamental X .
- Por cada dos vueltas del cigüeñal, el árbol de levas gira una vuelta en consecuencia la frecuencia correspondiente a este elemento es $X/2$.
- Al girar una vuelta el cigüeñal, dos pistones se encuentran en combustión por lo que la frecuencia asociada sería $2X$.

⁸⁵ Rossas, G. (2004). *Estudio de vibraciones mecánicas en máquinas reciprocantes*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. (p. 51).

- Durante las cuatro etapas de funcionamiento del ciclo diésel, 4 levas accionan a las válvulas, como el árbol de levas gira una vuelta por ciclo, la frecuencia asociada con las levas es de 4X.
- Mientras un pistón está en combustión los otros tres no lo están y generan vibración, al recorrer cada pistón dos carreras la frecuencia asociada es 6X.
- Por cada vuelta del cigüeñal se mueven 8 válvulas correspondientes a los pistones que no se encuentran en combustión por lo que la frecuencia asociada a estos elementos es 8X.

En la tabla 3.1 se presentan las diferentes frecuencias con los elementos relacionados del motor.

Tabla 3.1 Frecuencias y elementos relacionados

Frecuencia	Elemento relacionado
X/2	Árbol de levas
X	Cigüeñal
2X	Pistones en combustión
4X	Levas
6X	Pistones que no están en combustión
8X	Válvulas

En la tabla 3.2 se presenta las frecuencias fundamentales correspondientes a los diferentes regímenes de giro con los que se obtuvieron las pruebas experimentales y sus respectivos múltiplos.

Tabla 3.2 Frecuencias fundamentales.⁸⁶

Régimen de giro [rpm]	X/2 [Hz]	X [Hz]	2X [Hz]	4X [Hz]	6X [Hz]	8X [Hz]
820	6,83	13,67	27,33	54,67	82,00	109,33
1660	13,83	27,67	55,33	110,67	166,00	221,33
2500	20,83	41,67	83,33	166,67	250,00	333,33

⁸⁶ Fuente: Los autores

Para la obtención de los espectros patrones de vibración se realizó en cada régimen de giro cuatro pruebas experimentales en condiciones de óptimo funcionamiento, de las cuales se obtuvo la media de cada característica, luego se calculó la desviación con respecto a la media, que es la diferencia entre el valor de la observación y la media, para cada característica. Se compararon los valores de dichas desviaciones escogiendo como patrón de vibración a la prueba experimental que tenga la mayor cantidad de valores bajos de las desviaciones con respecto a la media, la selección del espectro se puede apreciar en el anexo 3.

3.1.1 ESPECTRO PATRÓN DE VIBRACIÓN A 820 RPM

El patrón de vibración a ralentí se obtuvo bajo las siguientes condiciones normales de funcionamiento:

- Régimen de giro del motor 820 rpm.
- Inyector en condiciones óptimas de funcionamiento inyectando el 100 % del volumen de inyección.
- Presión normal en el riel sin variación.

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 0 820 3 11
- CRDIMM 0 820 3 26
- CRDIMM 0 820 3 41
- CRDIMM 0 820 3 46

El espectro patrón elegido para el régimen de 820 rpm es el correspondiente a la prueba CRDIMM 0 820 3 41, dicho espectro se muestra en la figura 3.1, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.1.2 ESPECTRO PATRÓN DE VIBRACIÓN A 1660 RPM

El patrón de vibración a 1660 rpm se obtuvo bajo las siguientes condiciones normales de funcionamiento:

- Régimen de giro del motor 1660 rpm.
- Inyector en condiciones óptimas de funcionamiento inyectando el 100 % del volumen de inyección.
- Presión normal en el riel sin variación.

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 0 1660 3 47
- CRDIMM 0 1660 3 48
- CRDIMM 0 1660 3 49
- CRDIMM 0 1660 3 50

El espectro patrón elegido para el régimen de 1660 rpm es el correspondiente a la prueba CRDIMM 0 1660 3 49, dicho espectro se muestra en la figura 3.2, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivo múltiplos.

3.1.3 ESPECTRO PATRÓN DE VIBRACIÓN A 2500 RPM

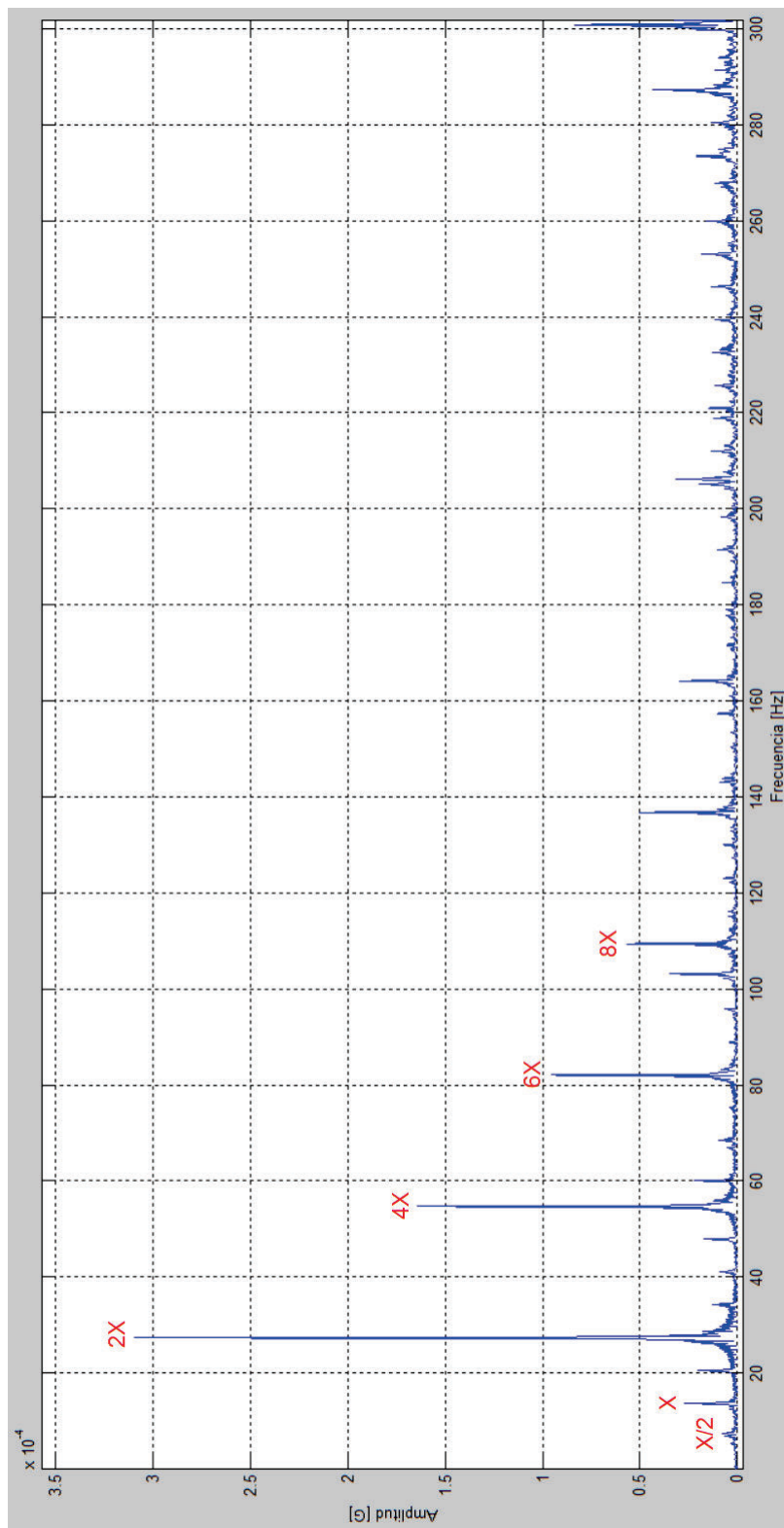
El patrón de vibración a 2500 rpm se obtuvo bajo las siguientes condiciones normales de funcionamiento:

- Régimen de giro del motor 2500 rpm.
- Inyector en condiciones óptimas de funcionamiento inyectando el 100 % del volumen de inyección.
- Presión normal en el riel sin variación.

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

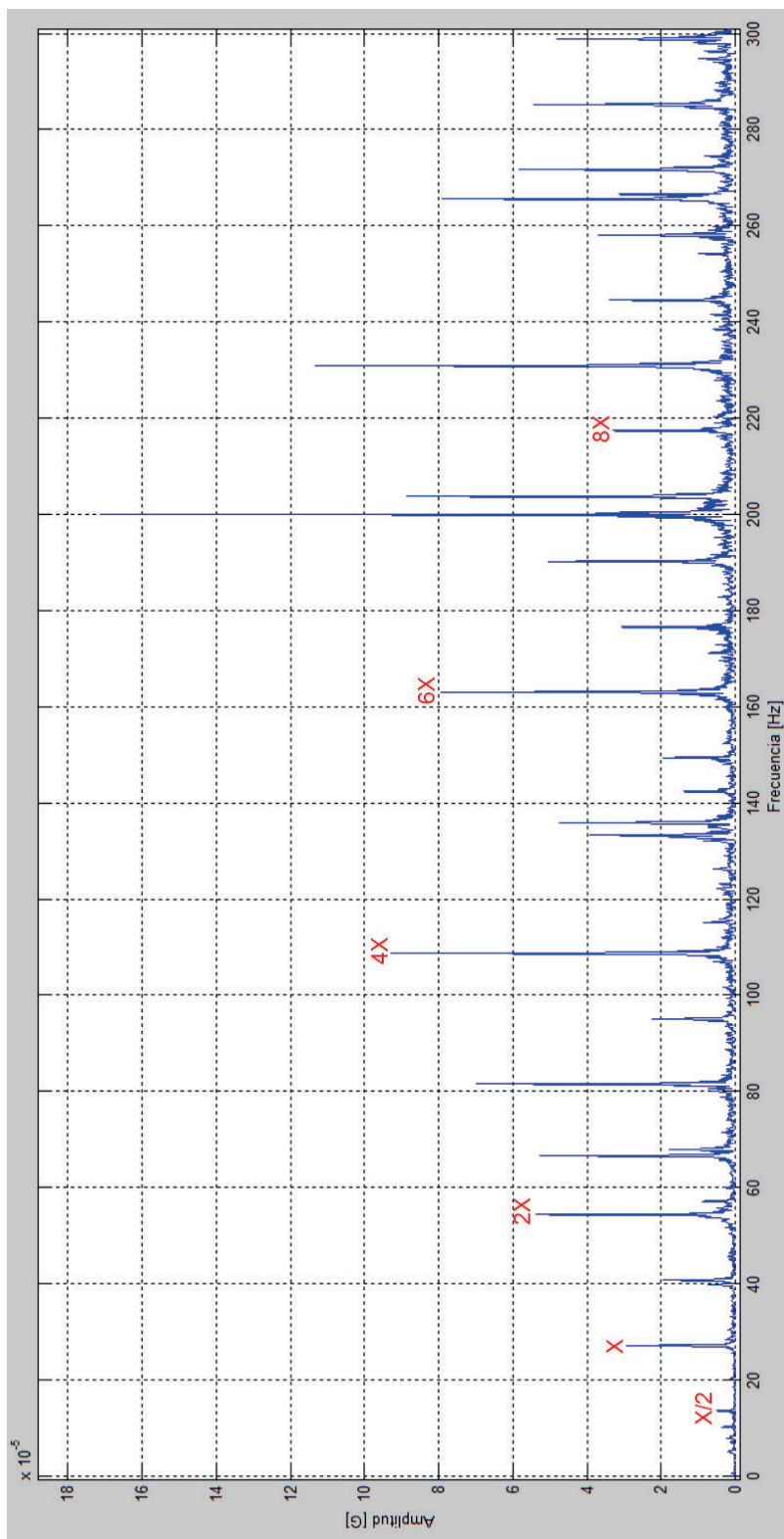
- CRDIMM 0 2500 3 12
- CRDIMM 0 2500 3 27
- CRDIMM 0 2500 3 42
- CRDIMM 0 2500 3 51

El espectro patrón elegido para el régimen de 2500 rpm es el correspondiente a la prueba CRDIMM 0 2500 3 27, dicho espectro se muestra en la figura 3.3, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivo múltiplos.



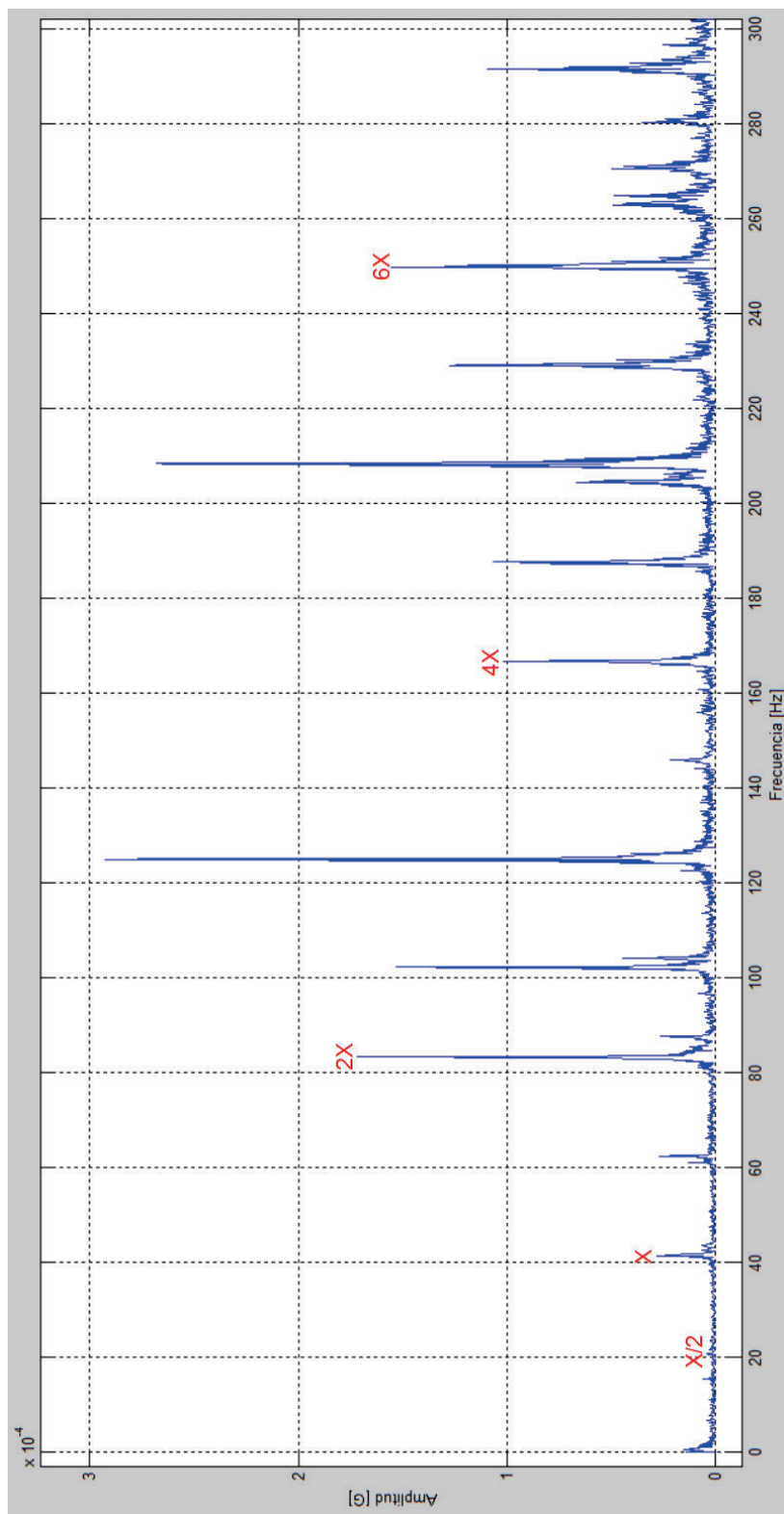
	X/2	X	2X	4X	6X	8X
Hz	6,875	13,63	27,38	54,75	82,13	109,4

Figura 3.1. Gráfica de espectro patrón a 820 rpm.



X/2	X	2X	4X	6X	8X	
Hz	13,63	27,13	54,38	108,6	163	217,4

Figura 3.2. Gráfica de espectro patrón a 1660 rpm.



	X/2	X	2X	4X	6X
Hz	20,88	41,5	83,38	166,8	249,8

Figura 3.3. Gráfica de espectro patrón a 2500 rpm.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS FALLOS SIMULADOS EN EL MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

Los fallos simulados en el motor CRDI Hyundai Santa Fe 2.0 se realizaron combinando los niveles de los factores controlables descritos en el punto 2.1.4.2.2.

Para la obtención de los espectros de vibración con falla, se realizó en cada régimen de giro diferentes pruebas experimentales, según el diseño de segundo orden de Box-Behnken. Para obtener el espectro de falla correspondiente en cada variación de factores, se efectuó el mismo proceso desarrollado para obtener los espectros patrones de vibración basados en la desviación con respecto a la media, la selección de estos espectros se puede ver en el anexo 4.

A continuación se describen los fallos producidos en el motor y se presenta los respectivos espectros obtenidos.

3.2.1 FALLO EN EL MOTOR SIN VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL A 820 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 0 820 1 9
- CRDIMM 0 820 1 24
- CRDIMM 0 820 1 39

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM 0 820 1 24, dicho espectro se muestra en la figura 3.4, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.2 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 820 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 10 820 2 2
- CRDIMM 10 820 2 17
- CRDIMM 10 820 2 32

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM 10 820 2 17, dicho espectro se muestra en la figura 3.5, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.3 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 820 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM -10 820 2 1
- CRDIMM -10 820 2 16
- CRDIMM -10 820 2 31

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM -10 820 2 31, dicho espectro se muestra en la figura 3.6, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.4 FALLO EN EL MOTOR SIN VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 0 1660 2 13

- CRDIMM 0 1660 2 14
- CRDIMM 0 1660 2 15

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM 0 1660 2 15, dicho espectro se muestra en la figura 3.7, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.5 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 10 1660 1 21
- CRDIMM 10 1660 1 36

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM 10 1660 1 21, dicho espectro se muestra en la figura 3.8, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.6 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM -10 1660 1 5
- CRDIMM -10 1660 1 20
- CRDIMM -10 1660 1 35

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM -10 1660 1 20, dicho espectro se muestra en la figura 3.9, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.7 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 100%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 10 1660 3 23
- CRDIMM 10 1660 3 38

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM 10 1660 3 23, dicho espectro se muestra en la figura 3.10, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.8 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 1660 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 100%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM -10 1660 3 7
- CRDIMM -10 1660 3 22
- CRDIMM -10 1660 3 37

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM -10 1660 3 22, dicho espectro se muestra en la figura 3.11, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.9 FALLO EN EL MOTOR SIN VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL A 2500 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 75,6%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 0 2500 1 10
- CRDIMM 0 2500 1 25

- CRDIMM 0 2500 1 40

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM 0 2500 1 25, dicho espectro se muestra en la figura 3.12, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.10 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MAS 10 BAR A 2500 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM 10 2500 2 4
- CRDIMM 10 2500 2 19
- CRDIMM 10 2500 2 34

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM 10 2500 2 4, dicho espectro se muestra en la figura 3.13, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

3.2.11 FALLO EN EL MOTOR CON VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL DE MENOS 10 BAR A 2500 RPM Y CON UN INYECTOR QUE POSEE UN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE INYECCIÓN DEL 87,8%

Para este régimen se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- CRDIMM -10 2500 2 3
- CRDIMM -10 2500 2 18
- CRDIMM -10 2500 2 33

El espectro elegido para esta falla es el correspondiente a la prueba CRDIMM -10 2500 2 33, dicho espectro se muestra en la figura 3.14, donde también se presenta la frecuencia fundamental (X) con sus respectivos múltiplos.

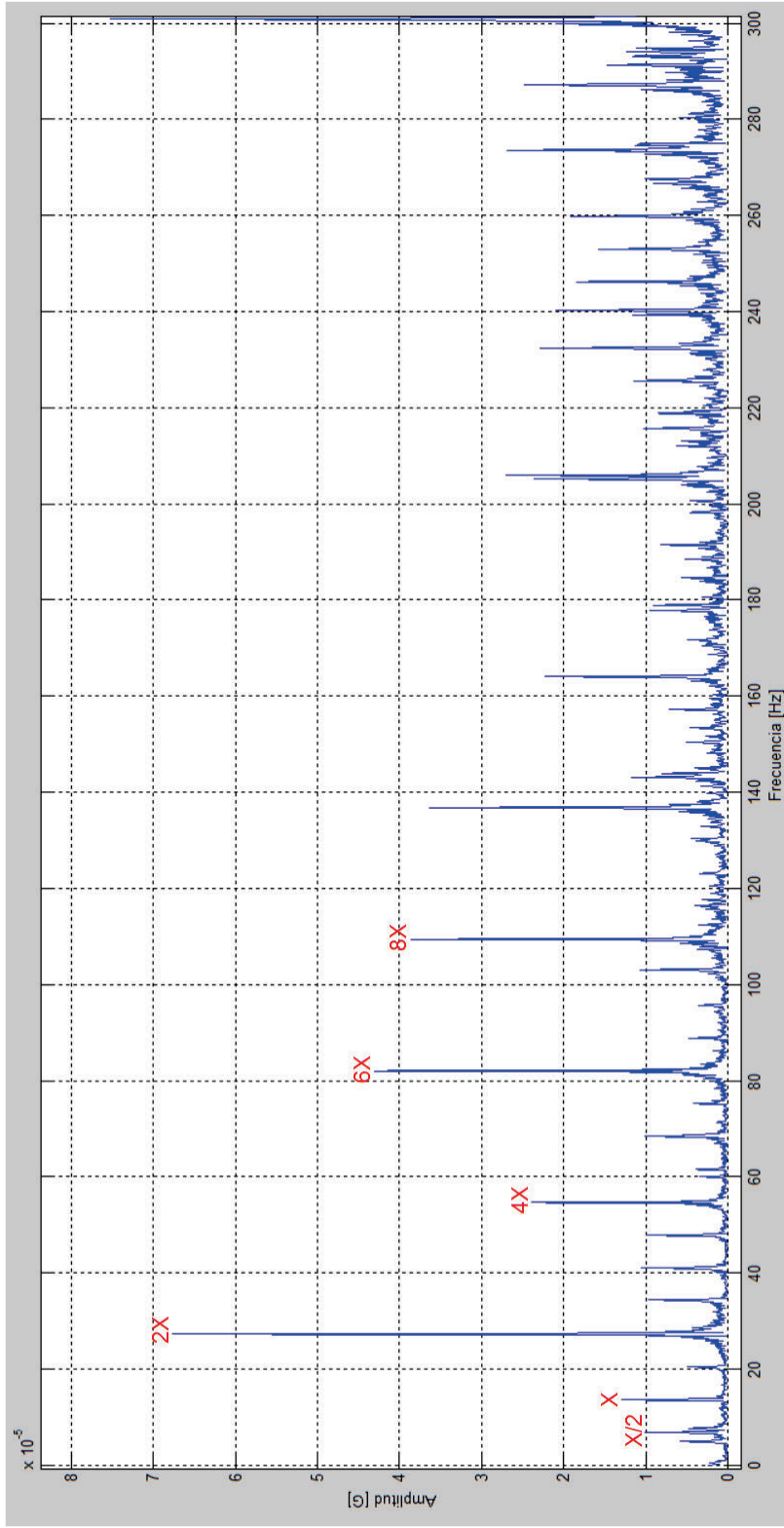


Figura 3.4. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM 0 820 1 24

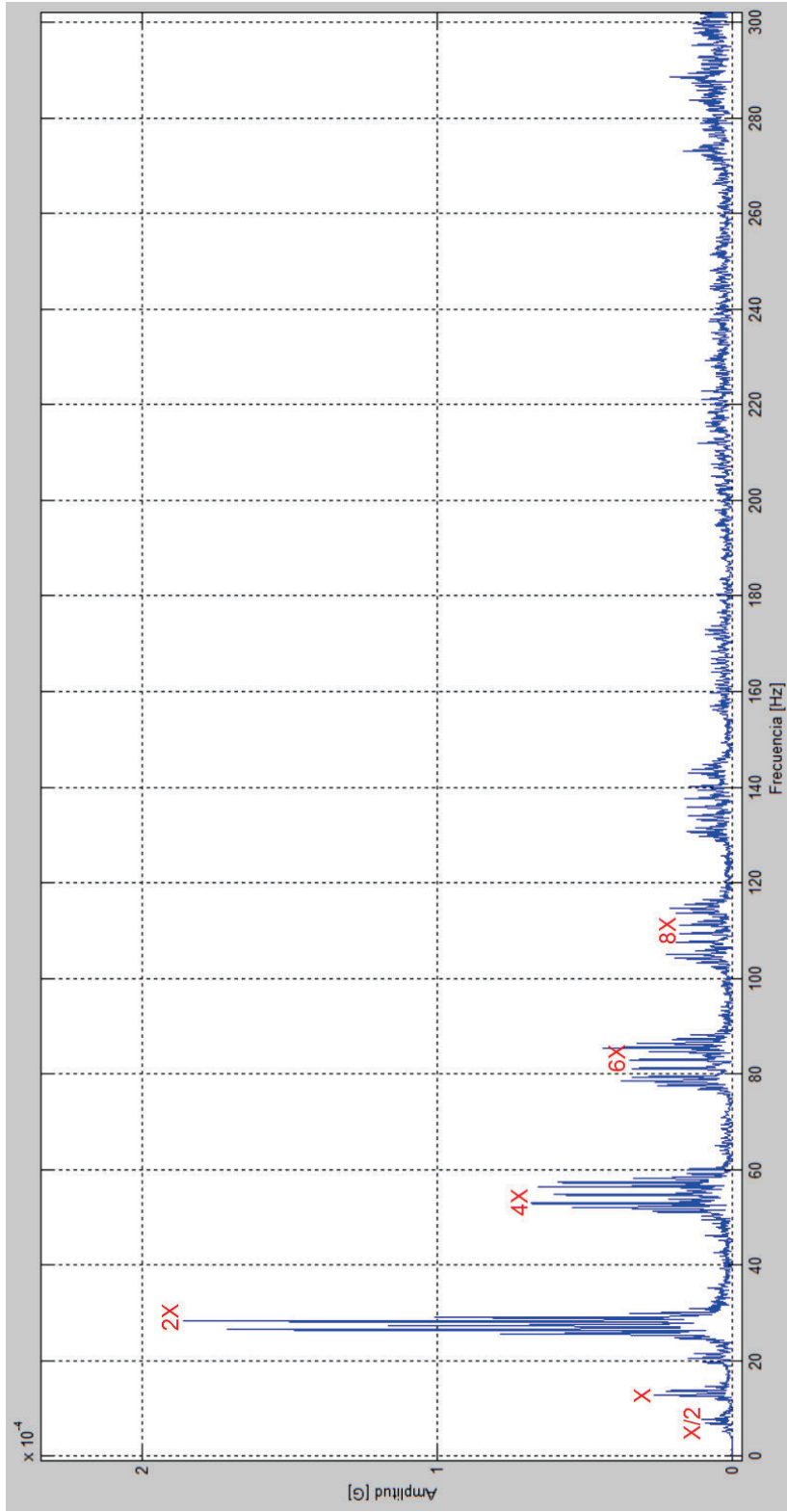


Figura 3.5. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM 10 820 2 17

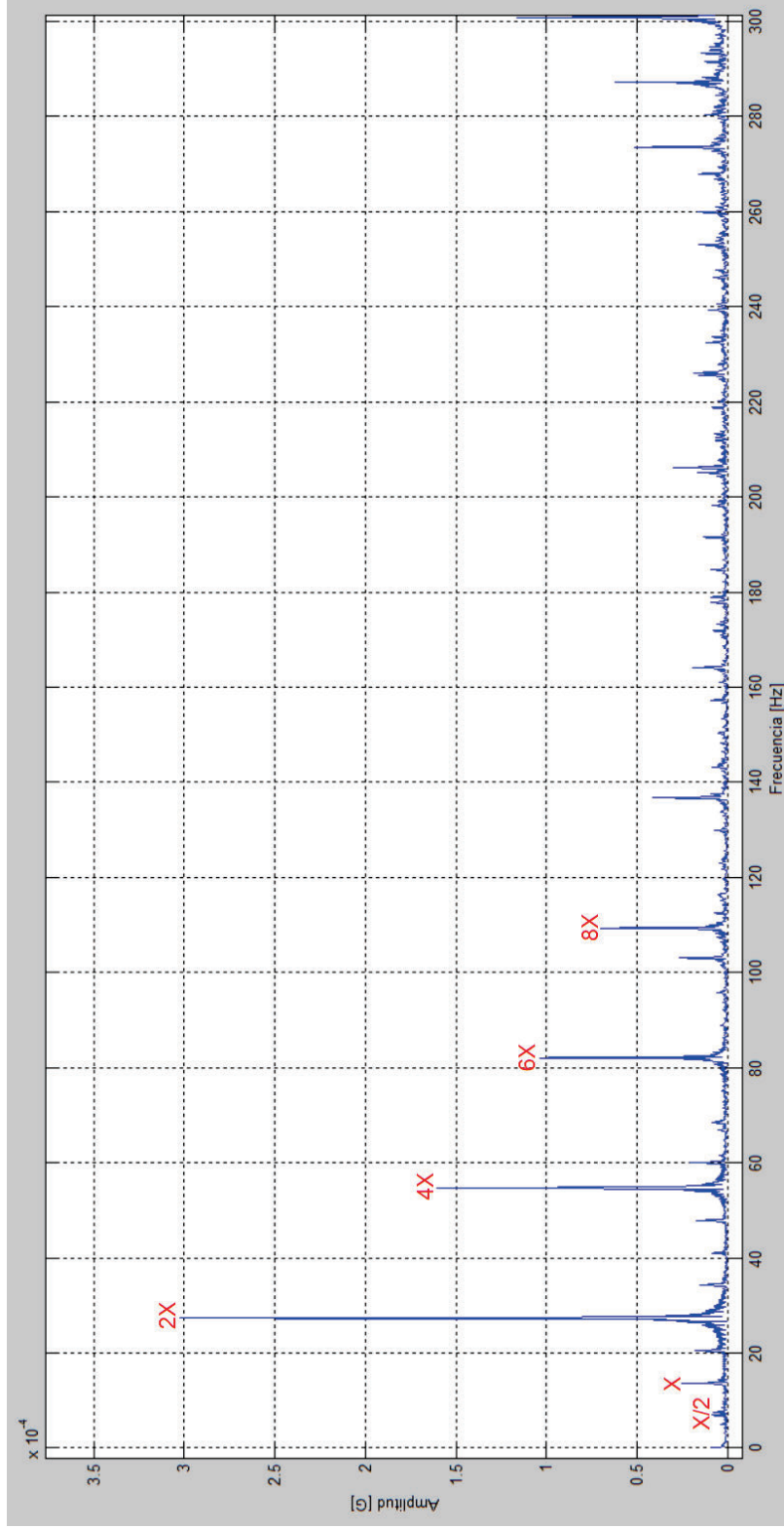


Figura 3.6. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM -10 820 2 31

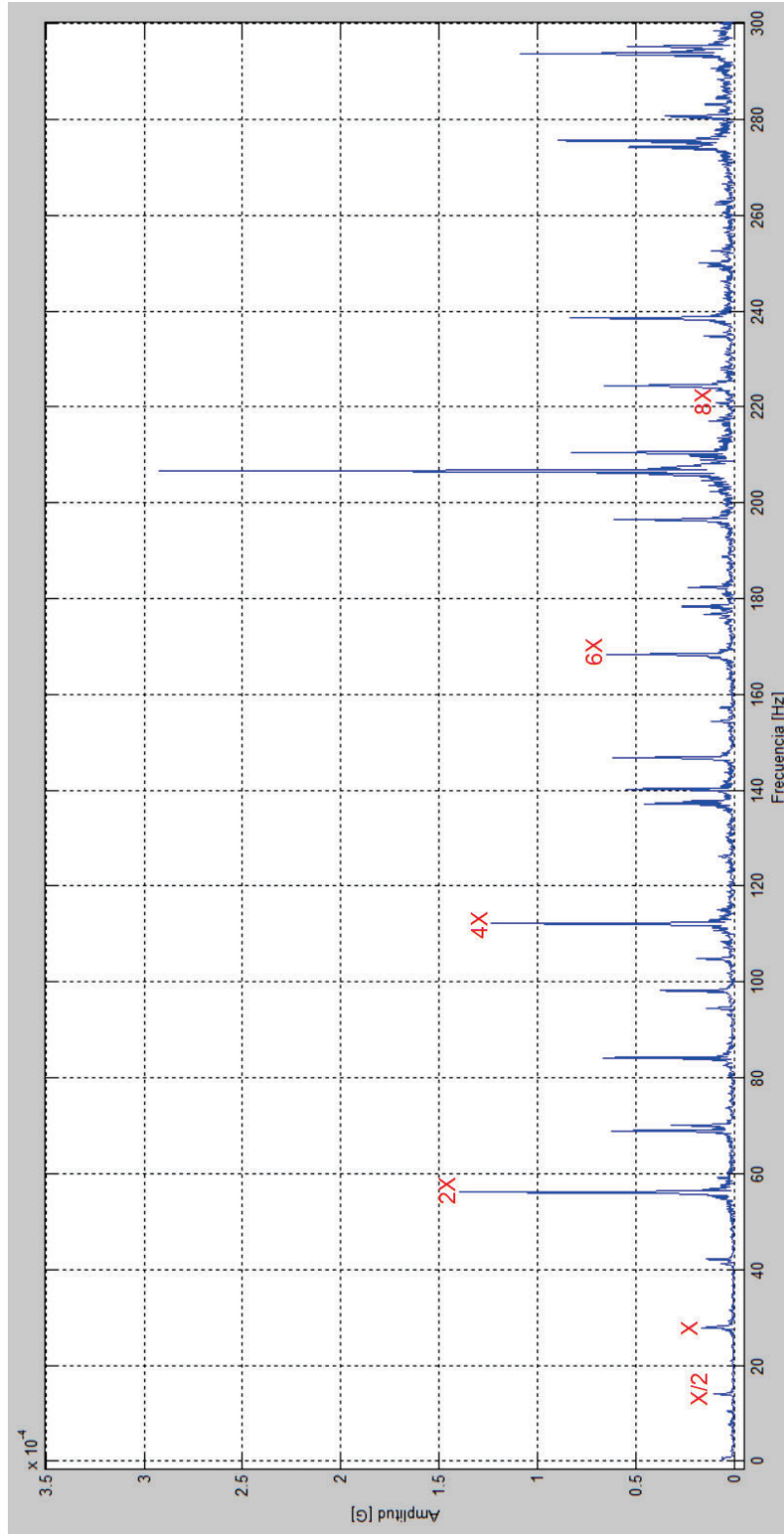


Figura 3.7. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM 0 1660 2 15

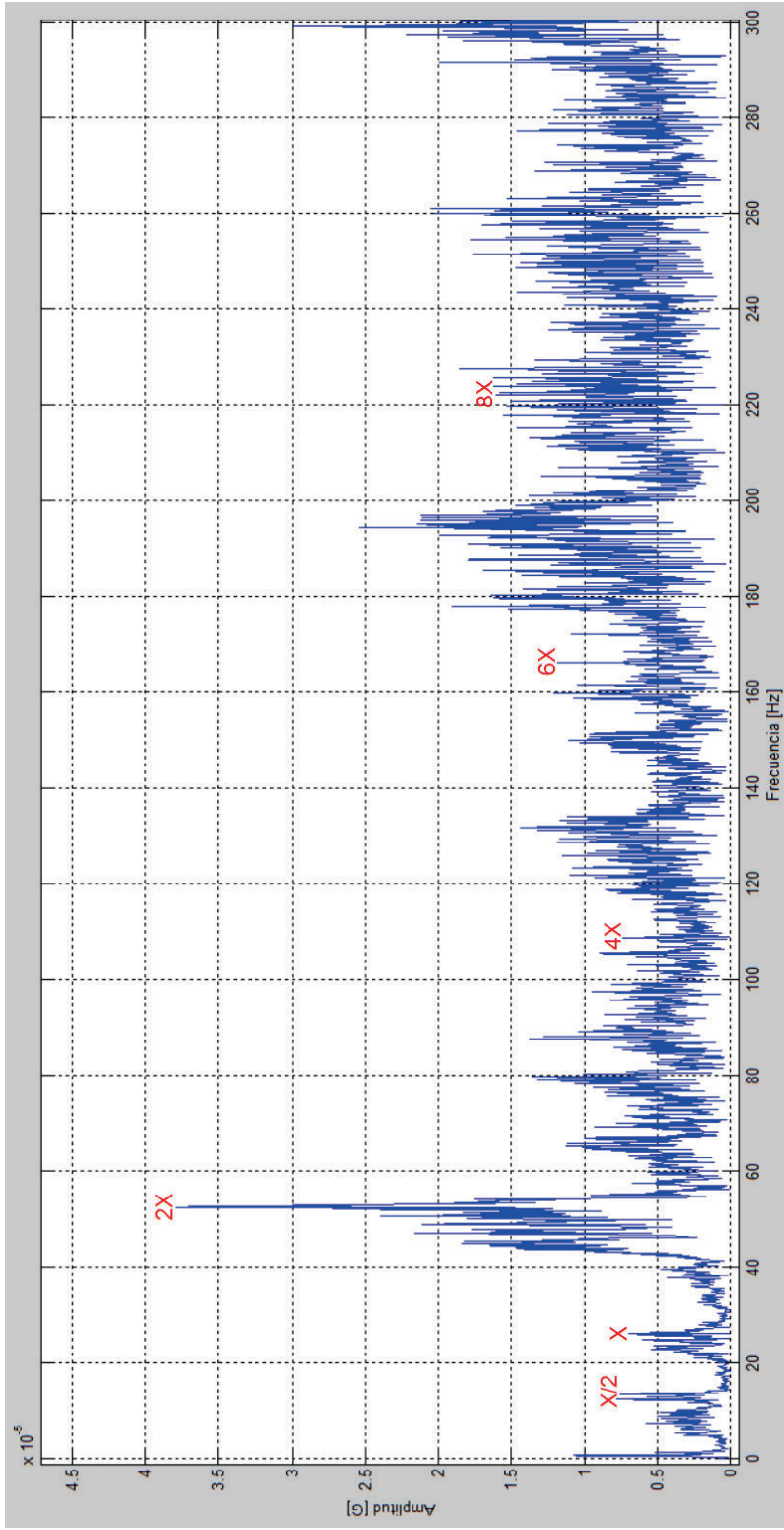


Figura 3.8. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM 10 1660 1 21

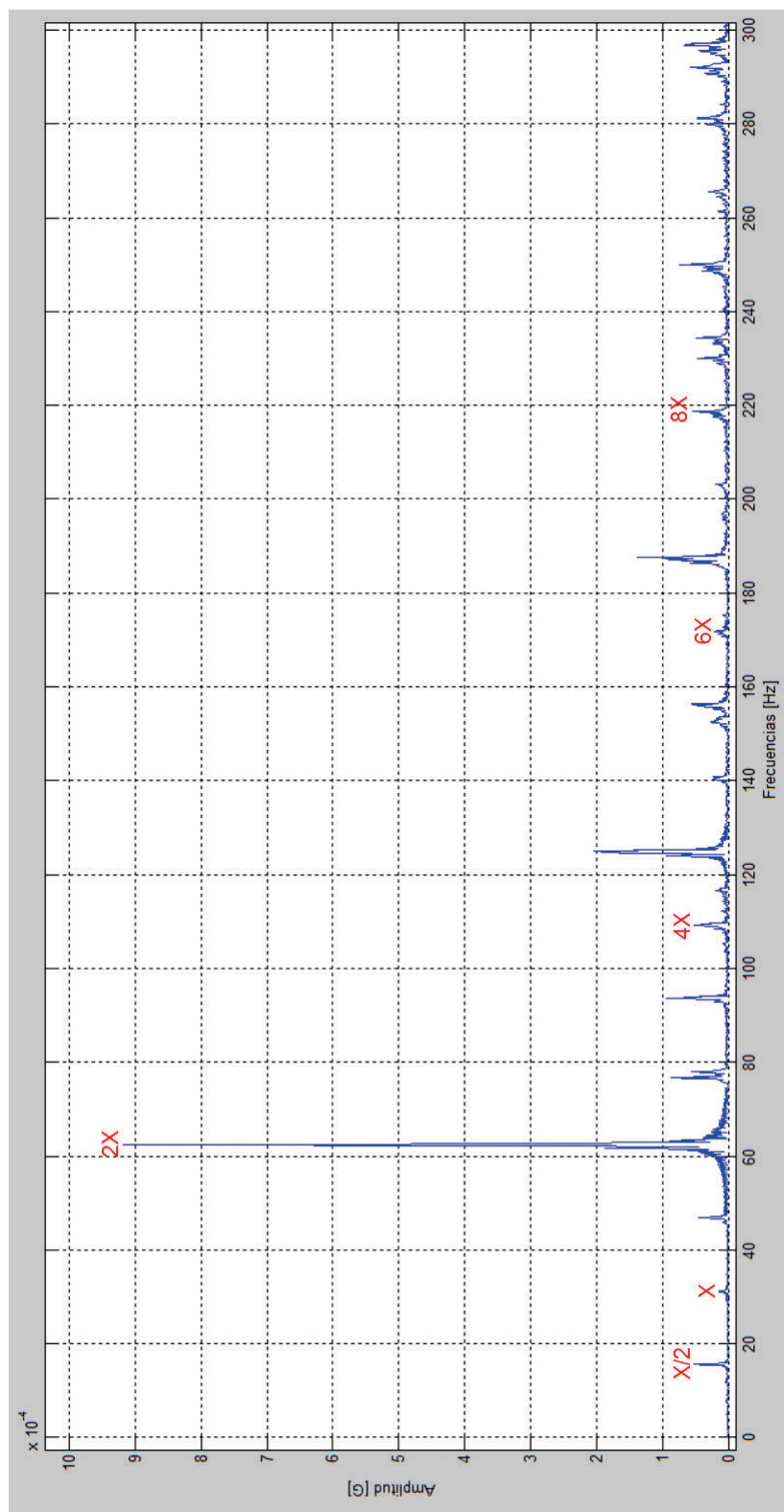


Figura 3.9. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM -10 1660 1 20

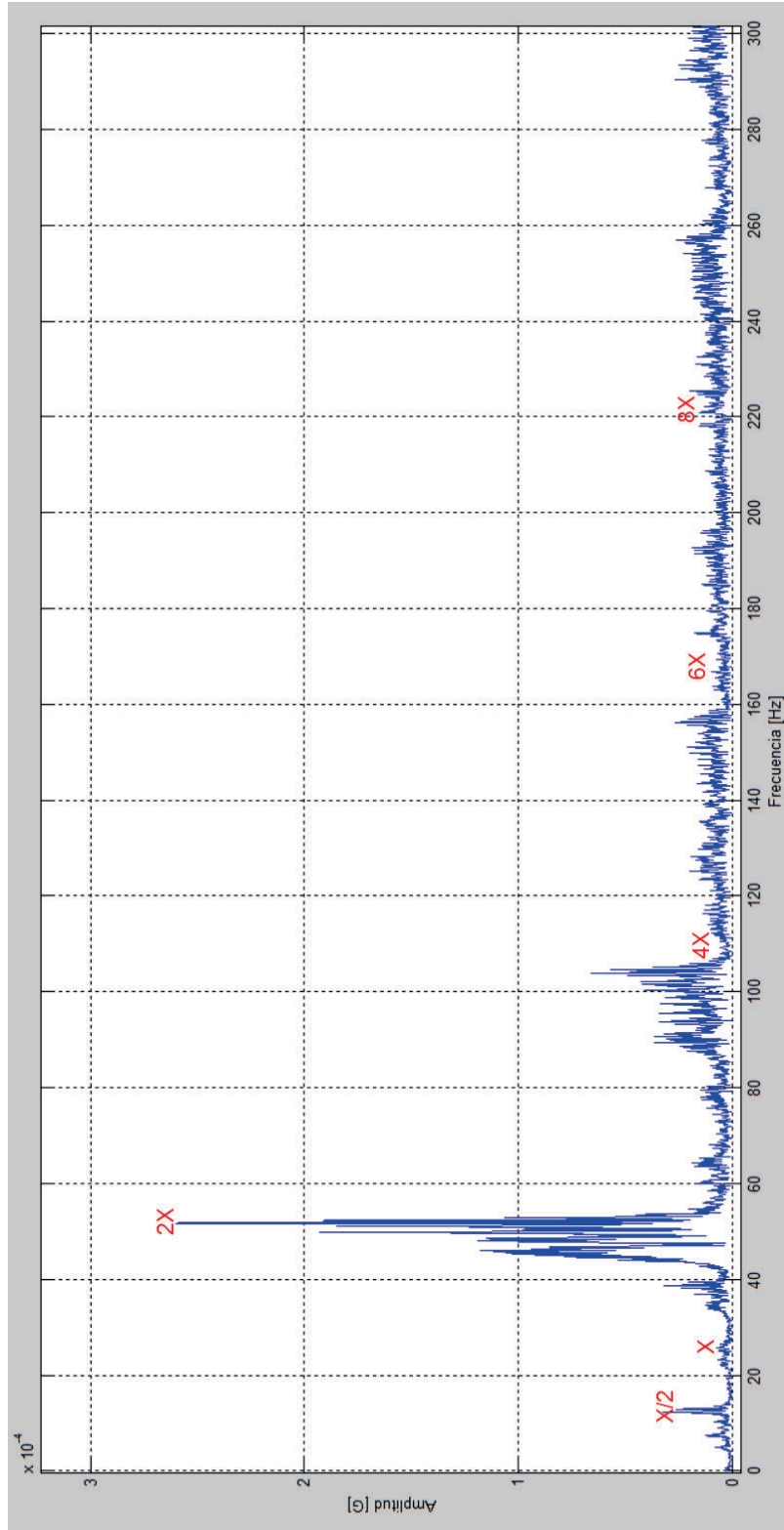


Figura 3.10. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM 10 1660 3 23

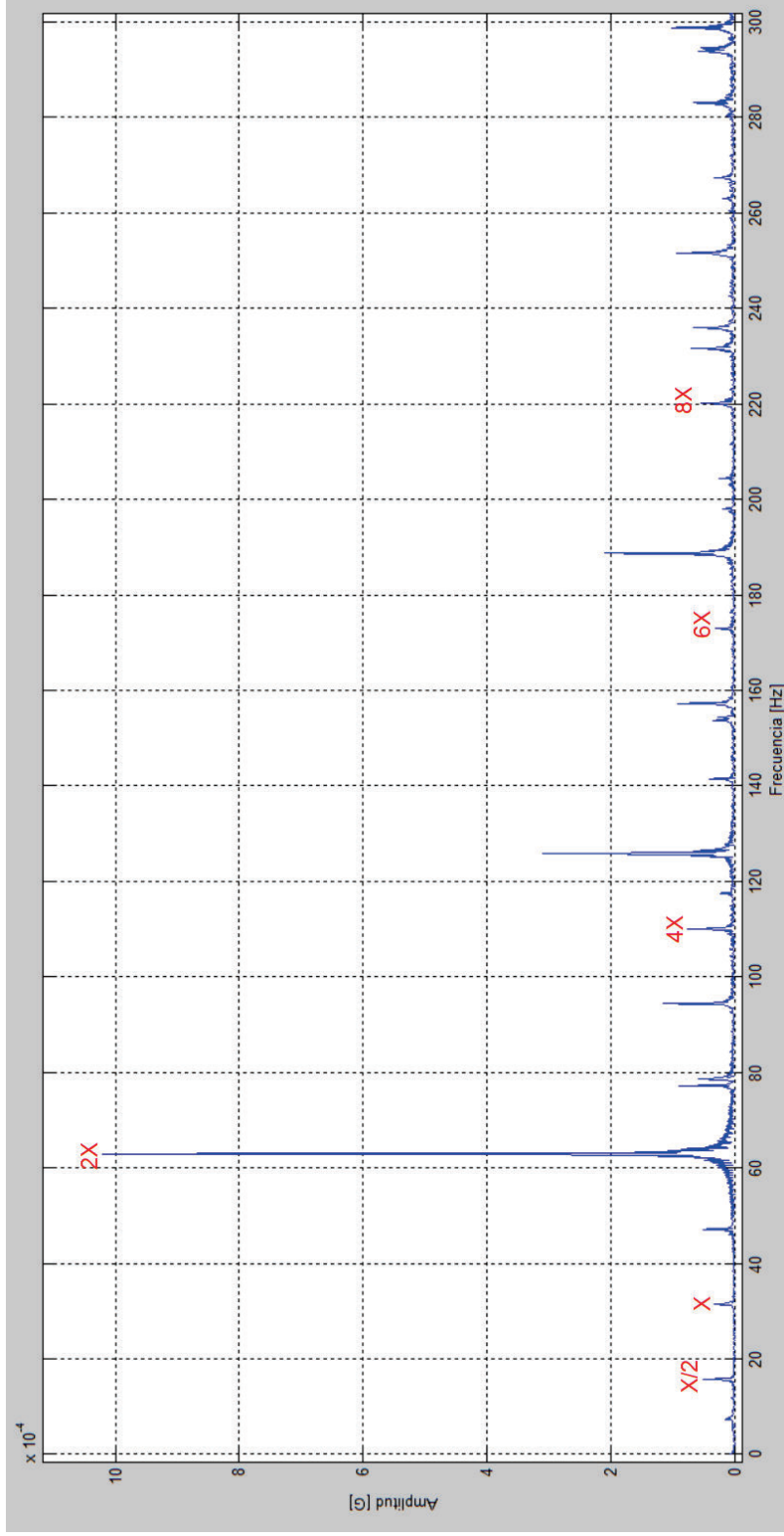


Figura 3.11. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM -10 1660 3 22

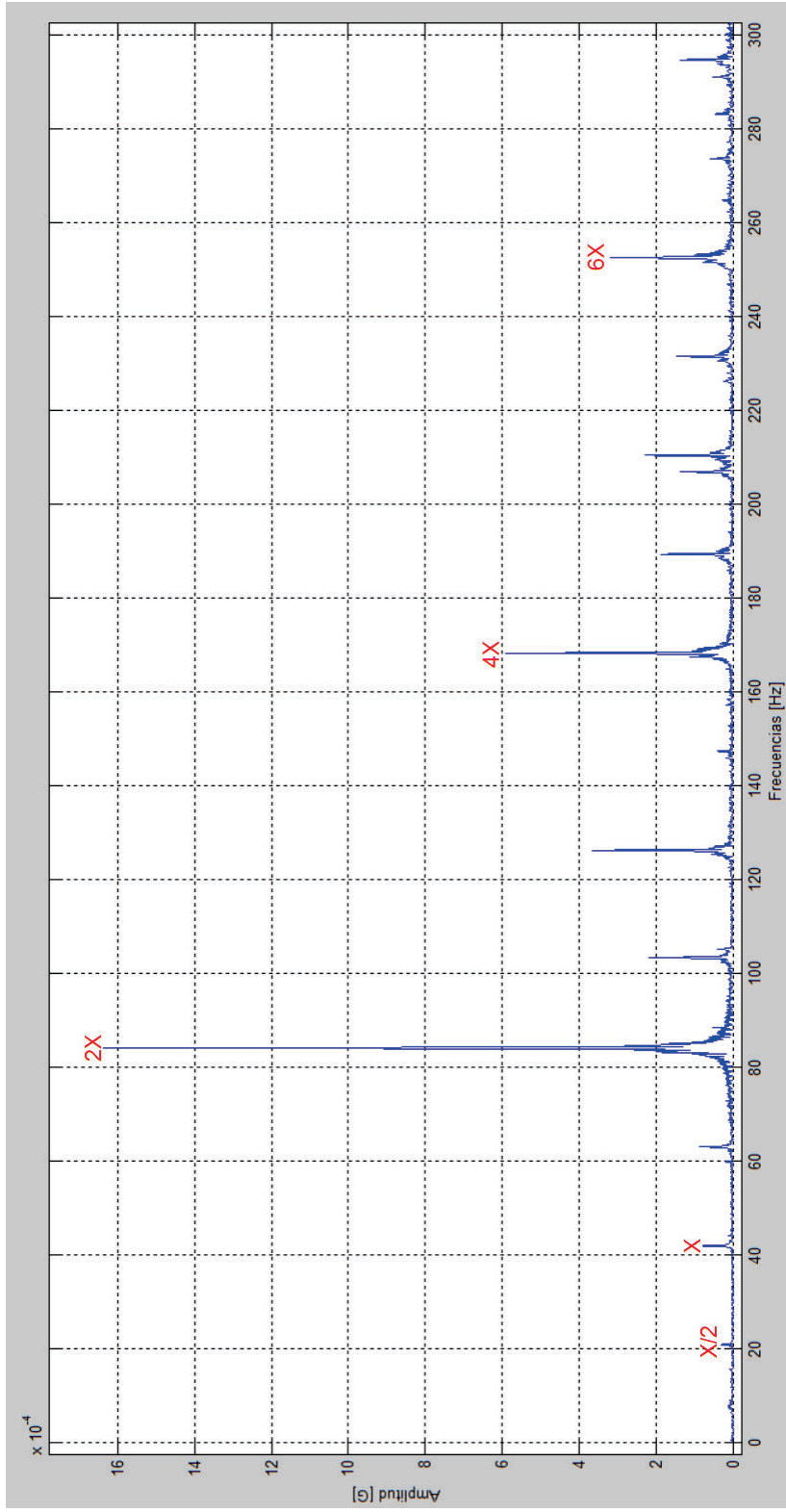


Figura 3.12. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM 0 2500 1 25

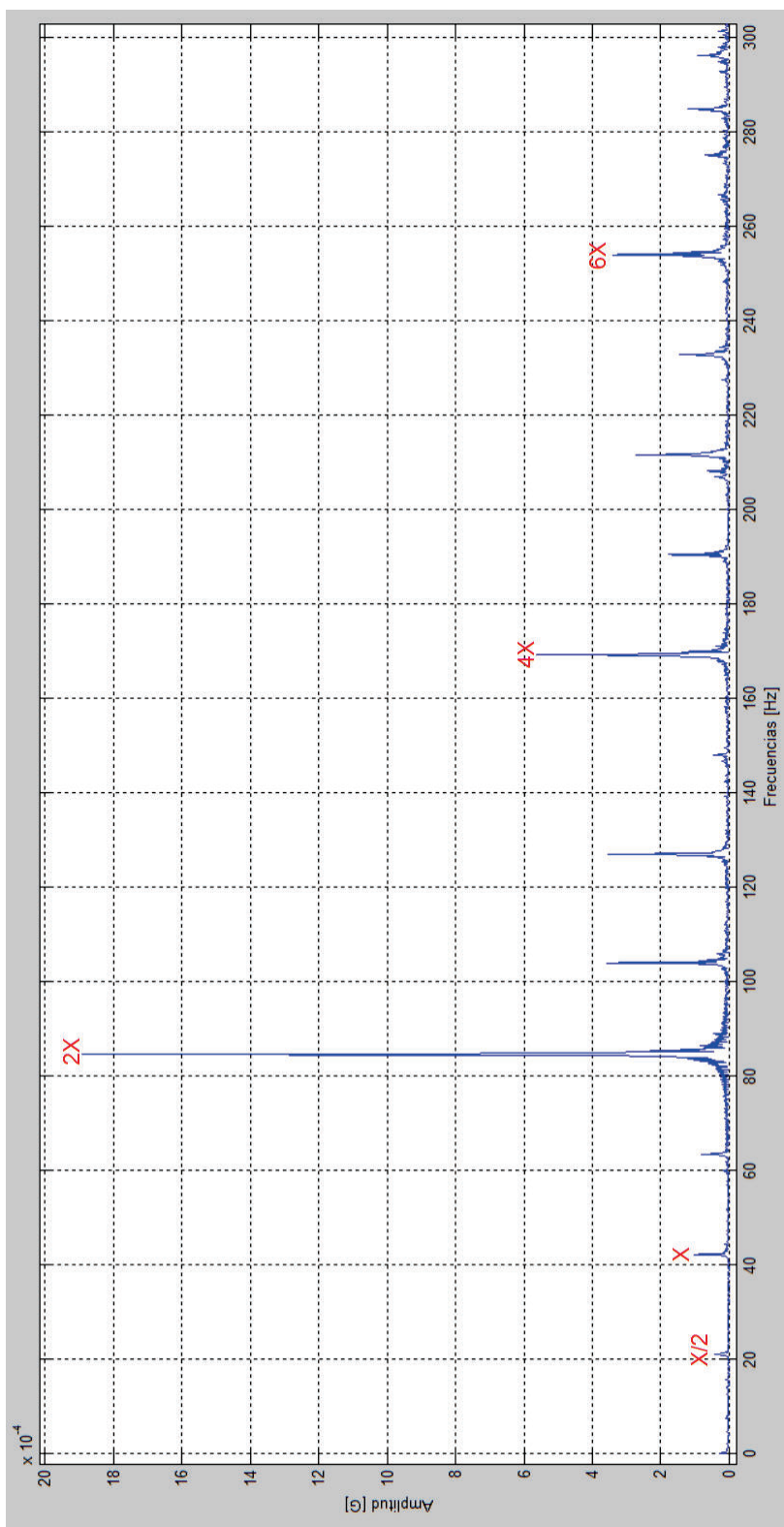


Figura 3.13. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDMM 10 2500 2 4

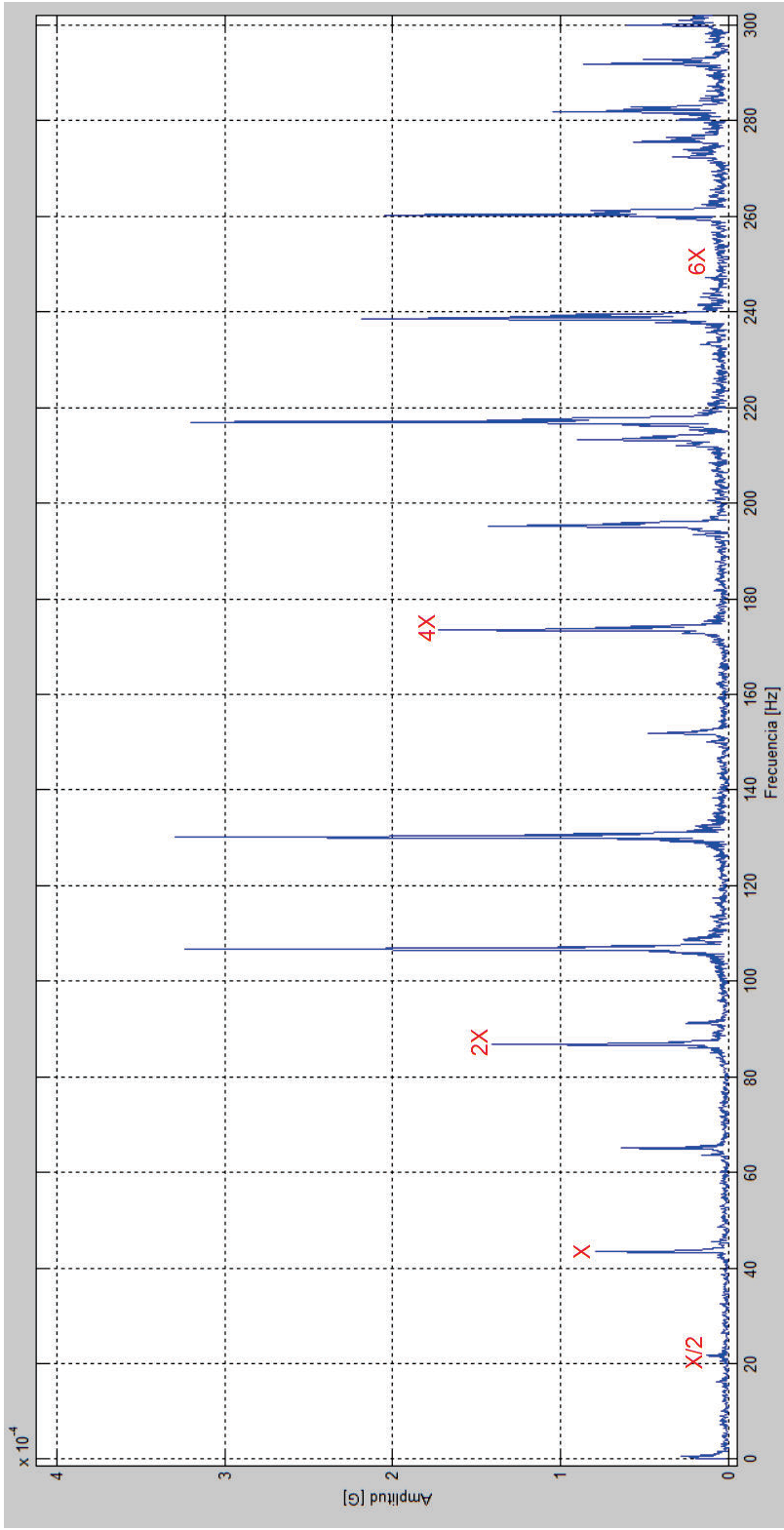


Figura 3.14. Gráfica de espectro de falla correspondiente al código CRDIMM -10 2500 2 33

3.3 CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN

Las condiciones bajo las cuales se realizan las pruebas experimentales se describen en el punto 2.2.3, es necesario que los resultados obtenidos en las pruebas experimentales bajo estas condiciones cumplan con los supuestos del modelo. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia. Esto es, la respuesta (Y) se debe distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes. Estos supuestos sobre Y se traducen en supuestos sobre el término error (ε) en el modelo. Es una práctica común utilizar la muestra de residuos para comprobar los supuestos del modelo, ya que si los supuestos se cumplen, los residuos o residuales se pueden ver como una muestra aleatoria de una distribución normal con media cero y varianza constante. Los residuos, e_{ij} , se definen como la diferencia entre la respuesta observada (Y_{ij}) y la respuesta predicha por el modelo (Y'_{ij}), lo cual permite hacer un diagnóstico más directo de la calidad del modelo, ya que su magnitud señala qué tan bien describe a los datos el modelo.⁸⁷

Para comprobar cada supuesto en el presente proyecto se utiliza las pruebas gráficas que presentan evidencia suficiente en contra o a favor de los supuestos, dichas graficas se muestran en la figura 3.15.

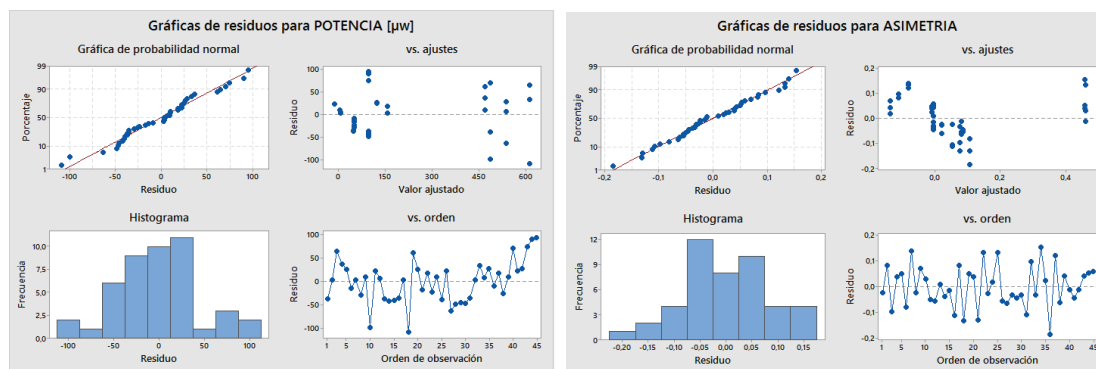


Figura 3.15. Gráficas de residuos de las variables de respuesta. ⁸⁸

⁸⁷ Gutiérrez Pulido, H. & De La Vara Salazar, R. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda Edición. pp. 81-82. México; McGraw-Hill.

⁸⁸ Fuente: Los autores

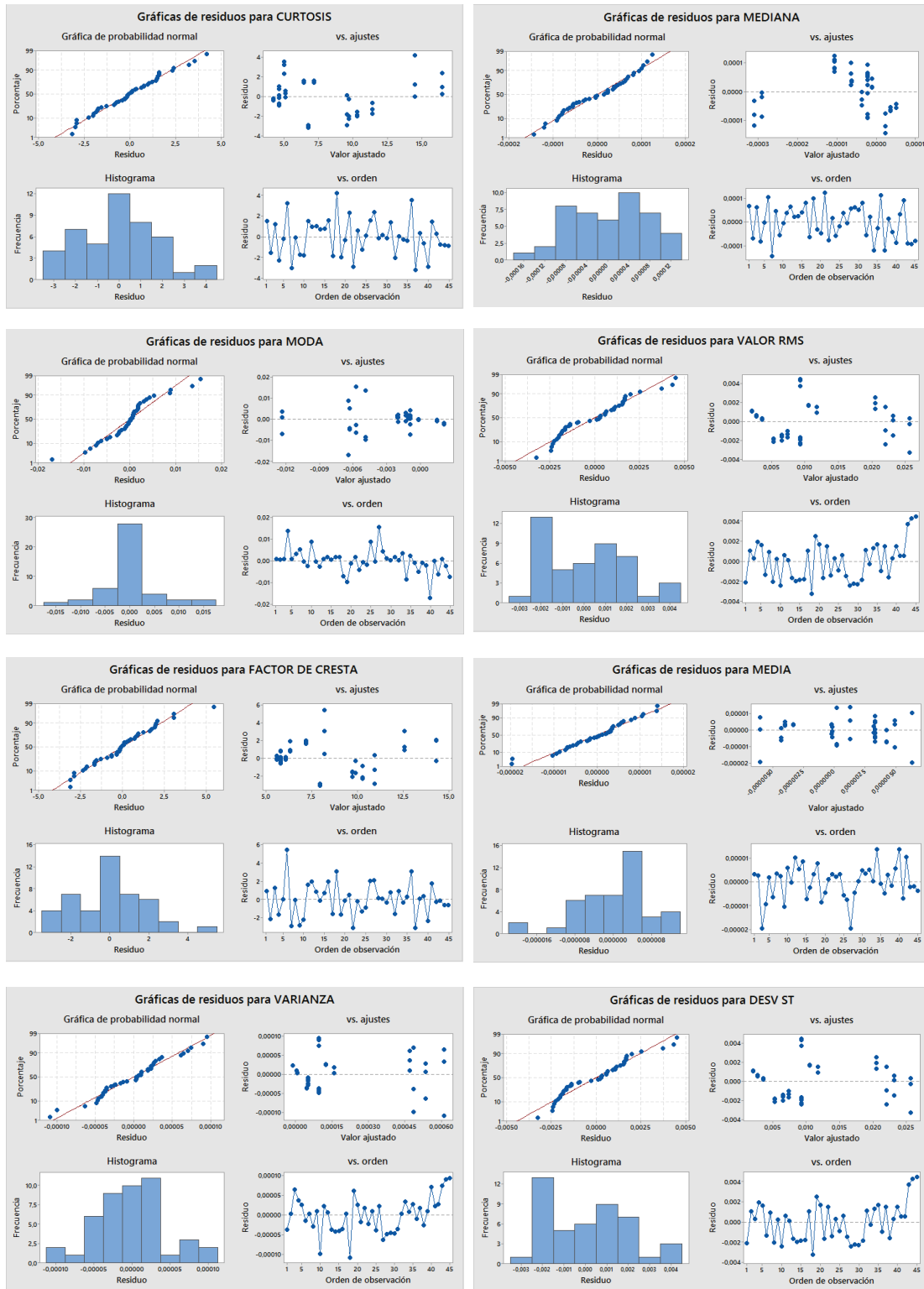


Figura 3.15. (Continuación) Gráficas de residuos de las variables de respuesta.

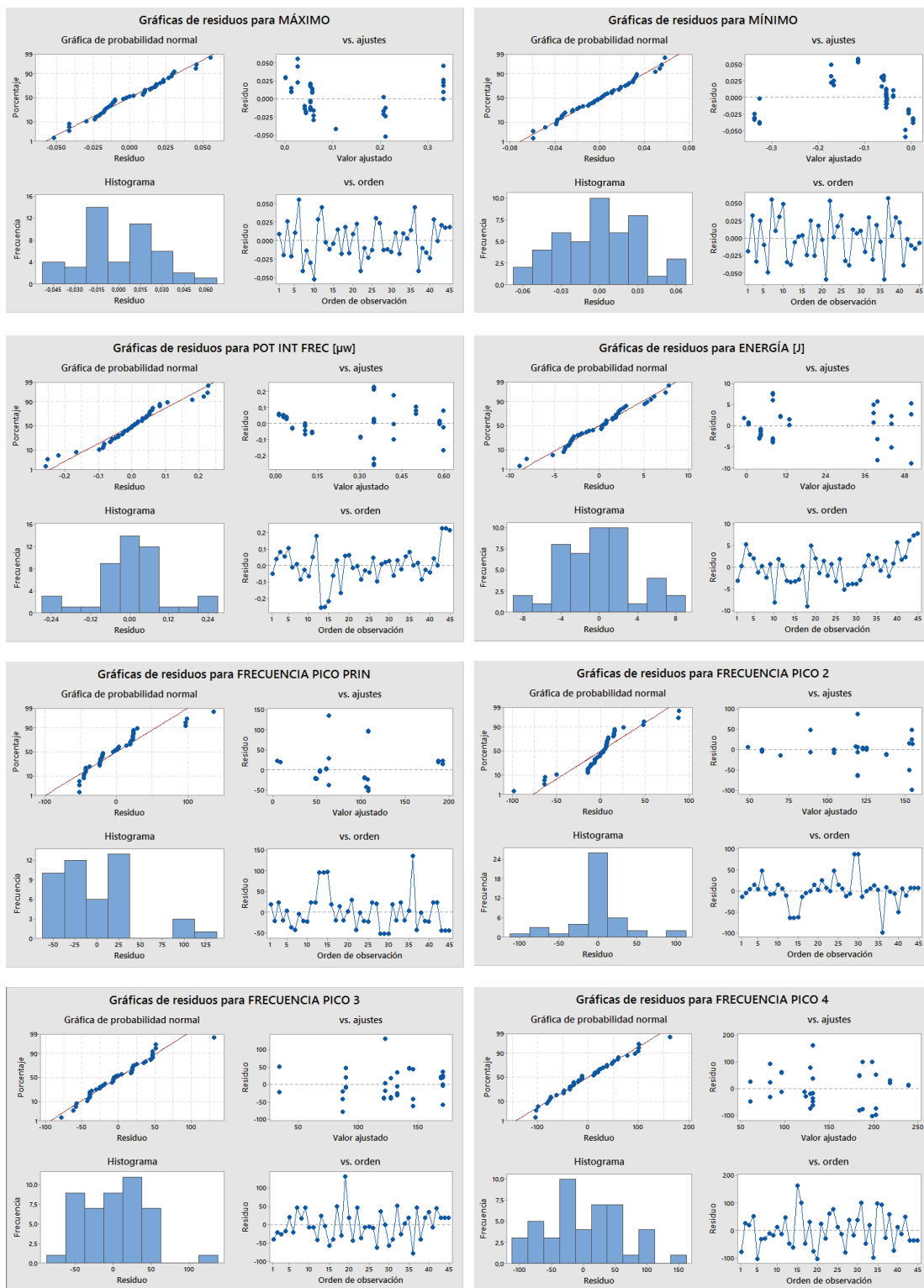


Figura 3.15. (Continuación) Gráficas de residuos de las variables de respuesta.

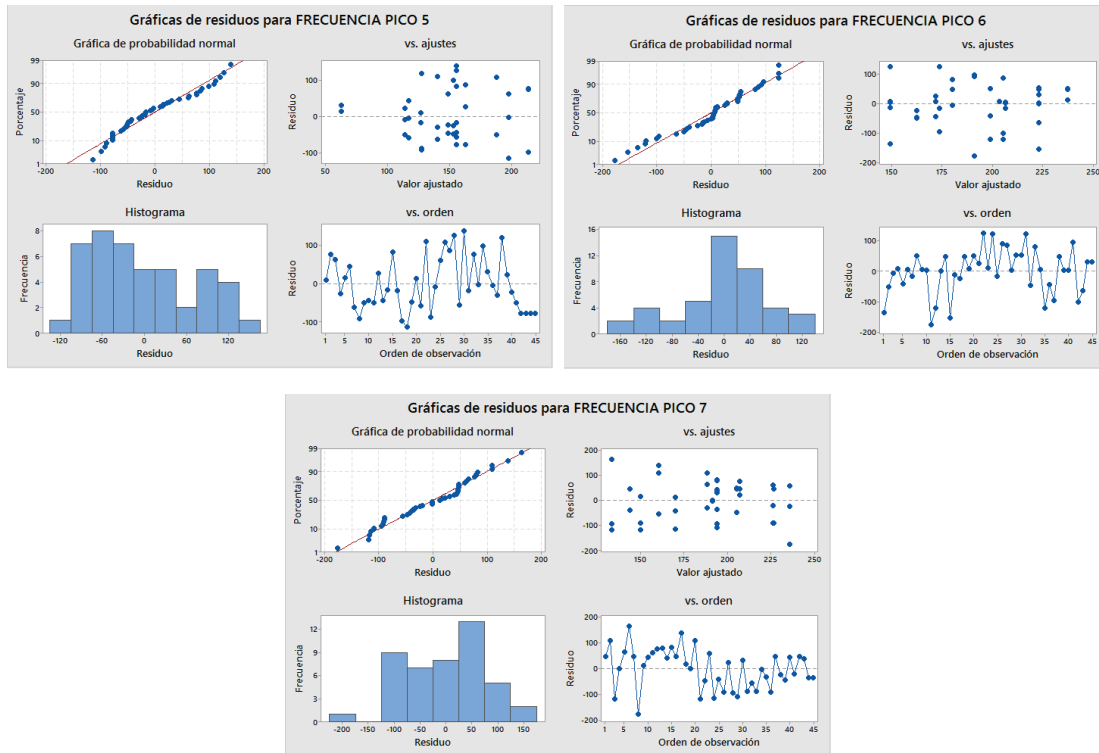


Figura 3.15. (Continuación) Gráficas de residuos de las variables de respuesta.

En algunas graficas de probabilidad en la figura 3.15 se presentan puntos atípicos como es el caso de la frecuencia pico principal, donde se puede ver claramente un punto que se encuentra muy alejado de la media 0, pero al ver la influencia de este punto en el histograma esta resulta insignificante. Cabe enfatizar que el ajuste de los puntos a la recta no tiene que ser perfecto, ya que el análisis de varianza resiste pequeñas y moderadas desviaciones al supuesto de normalidad.

En conclusión se aprecia en las gráficas de residuos presentadas en la figura 3.15, que:

- El supuesto de normalidad se cumple, ya que en la gráfica de probabilidad normal para cada caso los puntos tienden a quedar alineados en la línea recta, esto se corrobora en la gráfica del histograma para cada caso,
- El supuesto de igual varianza en los tratamientos se cumple, ya que en la gráfica de residuo versus valor ajustado, los puntos se distribuyen de manera aleatoria en una banda horizontal sin ningún patrón claro.

- El supuesto de independencia se cumple, ya que en la gráfica residuo versus orden de observación el comportamiento de los puntos es aleatorio.

El cumplimiento de estos supuestos garantiza que los valores obtenidos en las pruebas experimentales sean válidos y en consecuencia que los resultados y conclusiones tengan fundamento.

3.4 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.4.1 COMPARACIÓN ENTRE ESPECTROS PATRON Y ESPECTROS DE FALLA

Para este punto se realiza una gráfica para cada fallo que se describe con detalle en el punto 3.2, en la que consta el espectro patrón en color azul y sobre este el espectro de falla en color rojo, con el objetivo de poder apreciar con claridad las variaciones que se presentan en la frecuencia así como también en la amplitud en cada espectro.

3.4.1.1 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 820 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 0 820 1 24

En la figura 3.16 se aprecia el espectro patrón a 820 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%, se observa que no existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, sin embargo las amplitudes de cada uno de los armónicos del espectro de fallo disminuyen con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón.

3.4.1.2 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 820 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 820 2 17

En la figura 3.17 se aprecia el espectro patrón a 820 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %, se observa que no existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, pero existen sub armónicos junto a cada armónico principal que se presentan por la inestabilidad del motor debido a la variación de las revoluciones por minuto, además la amplitud del armónico X/2 del espectro de fallo aumenta mientras que los demás armónicos disminuyen su amplitud de forma progresiva, con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón.

3.4.1.3 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 820 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 820 2 31

En la figura 3.18 se aprecia el espectro patrón a 820 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %, se observa que no existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, sin embargo las amplitudes de los armónicos X/2, 6X y 8X del espectro de fallo aumentaron con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón y las amplitudes de los armónicos X, 2X y 4X del espectro de fallo disminuyen.

3.4.1.4 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 0 1660 2 15

En la figura 3.19 se aprecia el espectro patrón a 1660 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%, se observa que existe un desfase entre los armónicos del

espectro patrón con los armónicos del fallo, por ejemplo el desfase que existe para el armónico X es de 0,75 Hz, lo cual indica la variación de revoluciones por minuto entre la prueba experimental a condiciones normales y la prueba experimental con el fallo simulado, este incremento de desfase se hace más notorio en los armónicos que le siguen al armónico X, mientras que las amplitudes de los armónicos X/2, 2X y 4X del espectro de fallo aumentaron con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón y las amplitudes de los armónicos X, 6X y 8X del espectro de fallo disminuyen.

3.4.1.5 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 1660 1 21

En la figura 3.20 se aprecia el espectro patrón a 1660 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%, se observa que el único armónico que coincide en valor de frecuencia entre el espectro patrón y el espectro del fallo es el 4X, mientras que existe un desfase en el resto de armónicos, por ejemplo el desfase que existe para el armónico X es de - 1,13 Hz, además se presenta una considerable cantidad de sub armónicos junto a cada armónico principal, lo cual indica la gran inestabilidad del motor durante la prueba experimental de fallo, por la variación de revoluciones por minuto entre la prueba experimental a condiciones normales y la prueba experimental con el fallo simulado, mientras que la amplitud del armónicos X/2 del espectro de fallo aumenta con respecto a la amplitud del armónico del espectro patrón y las amplitudes de los demás armónicos disminuye.

3.4.1.6 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 1660 1 20

En la figura 3.21 se aprecia el espectro patrón a 1660 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un

porcentaje de volumen de inyección del 75,6%, se observa que existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, por ejemplo el desfase que existe para el armónico X es de 3,87 Hz, lo cual indica la variación de revoluciones por minuto entre la prueba experimental a condiciones normales y la prueba experimental con el fallo simulado, mientras que las amplitudes de los armónicos X/2, 2X y 8X, del espectro de fallo aumentaron con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón, de los tres el que presenta un incremento considerable es el de 2X, y las amplitudes de los armónicos X, 4X y 6X del espectro de fallo disminuyen.

3.4.1.7 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 1660 3 23

En la figura 3.22 se aprecia el espectro patrón a 1660 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100 %, se observa que existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, por ejemplo el desfase que existe para el armónico X es de 1,38 Hz, lo cual indica la variación de revoluciones por minuto entre la prueba experimental a condiciones normales y la prueba experimental con el fallo simulado, mientras que la amplitud del armónico X/2 del espectro de fallo aumenta con respecto a la amplitud del armónico del espectro patrón, el resto de armónicos disminuye.

3.4.1.8 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 1660 3 22

En la figura 3.23 se aprecia el espectro patrón a 1660 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100 %, se observa que existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, por ejemplo el

desfase que existe para el armónico X es de 4,24 Hz, lo cual indica la variación de revoluciones por minuto entre la prueba experimental a condiciones normales y la prueba experimental con el fallo simulado, mientras que las amplitudes de los armónicos X/2, X, 2X y 8X, del espectro de fallo aumentaron con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón, de los cuatro el que presenta un incremento considerable es el de 2X, y las amplitudes de los armónicos 4X y 6X del espectro de fallo disminuyen.

3.4.1.9 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 0 2500 1 25

En la figura 3.24 se aprecia el espectro patrón a 2500 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%, se observa que existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, por ejemplo el desfase que existe para el armónico X es de 0,5 Hz, este desfase se va incrementando progresivamente para los armónicos que le siguen a X, además las amplitudes de cada uno de los armónicos del espectro de fallo aumentan con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón, se puede apreciar un incremento considerable en el armónico de 2X.

3.4.1.10 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM 10 2500 2 4

En la figura 3.25 se aprecia el espectro patrón a 2500 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %, se observa que existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, por ejemplo el desfase que existe para el armónico X es de 0,75 Hz, este desfase se va incrementando progresivamente para los armónicos que le siguen a X, además las

amplitudes de cada uno de los armónicos del espectro de fallo aumentan con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón, se puede apreciar un incremento considerable en el armónico de 2X.

3.4.1.11 Comparación entre espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm con espectro de falla correspondiente a la prueba experimental CRDIMM -10 2500 2 33

En la figura 3.26 se aprecia el espectro patrón a 2500 rpm y el espectro de falla correspondiente a la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %, se observa que existe un desfase entre los armónicos del espectro patrón con los armónicos del fallo, por ejemplo el desfase que existe para el armónico X es de 1,88 Hz, este desfase se va incrementando progresivamente para los armónicos que le siguen a X a excepción del armónico 6X que tiene un incremento pero el mismo no es mayor al de 4X, mientras que las amplitudes de los armónicos X/2, X y 4X, del espectro de fallo aumentaron con respecto a las amplitudes de los armónicos del espectro patrón, y las amplitudes de los armónicos 2X y 6X del espectro de fallo disminuyen.

3.4.2 ANÁLISIS DE LA AMPLITUD DE LAS FRECUENCIAS

En este punto se analiza la variación de las amplitudes de las frecuencias, que se genera al realizar los diferentes fallos simulados en el motor a distintos regímenes de giro, tanto en la frecuencia fundamental como en sus respectivos múltiplos, en relación a la amplitud obtenida en la prueba experimental bajo condiciones normales, la cual se presentará en las gráficas a ser analizadas como una barra en color verde.

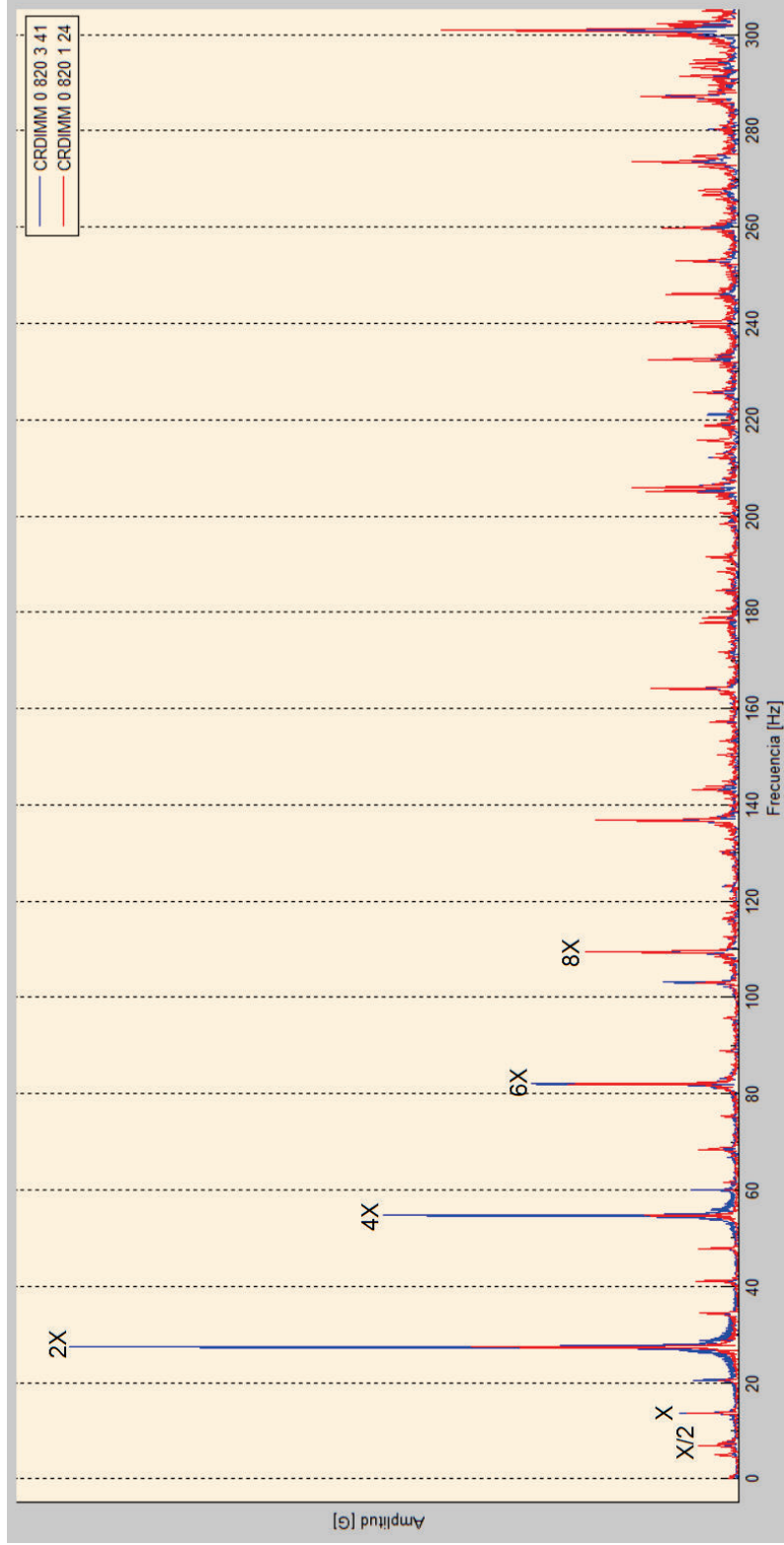


Figura 3.16. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 0 820 1 24

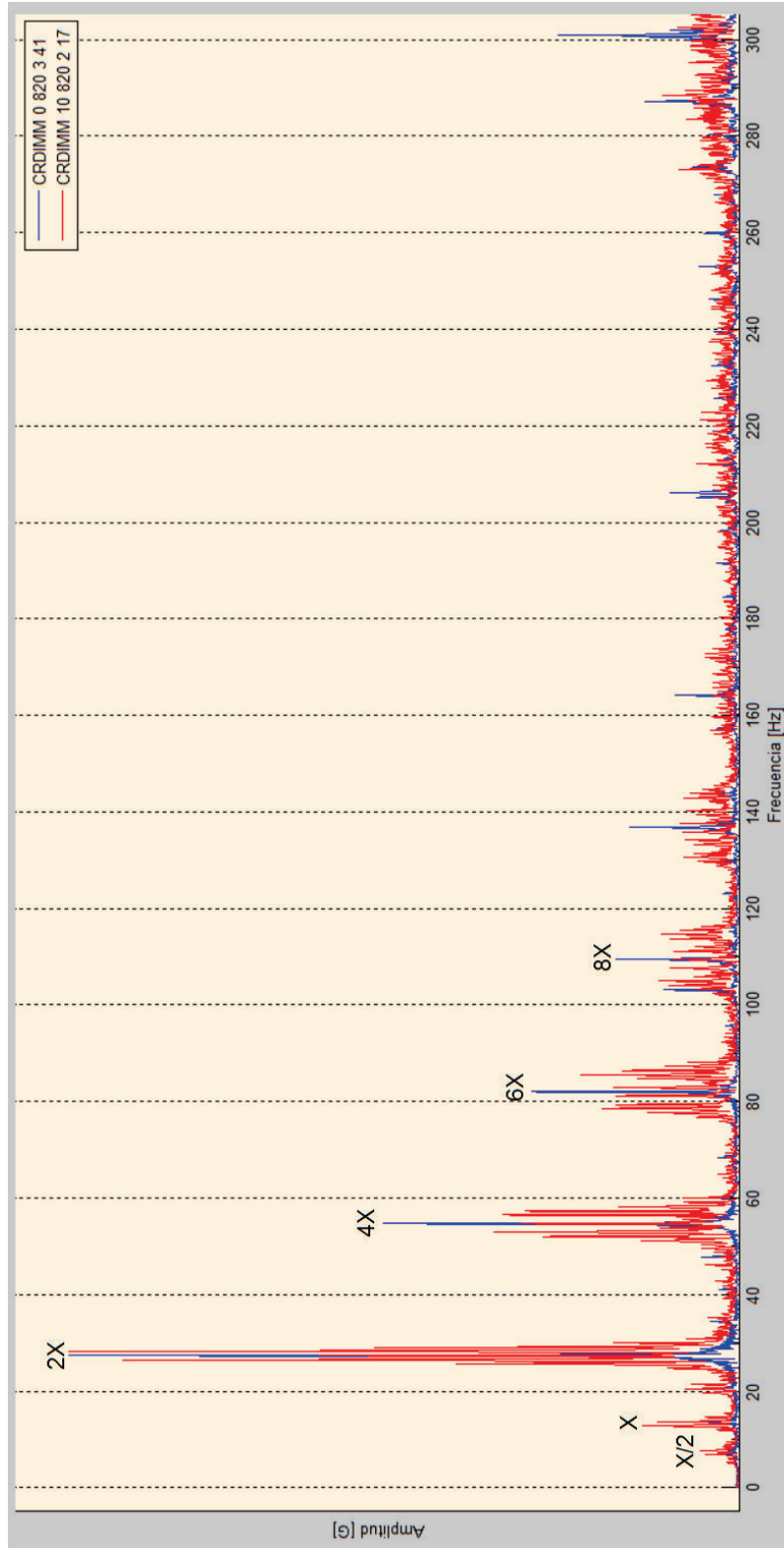


Figura 3.17. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 10 820 2 17

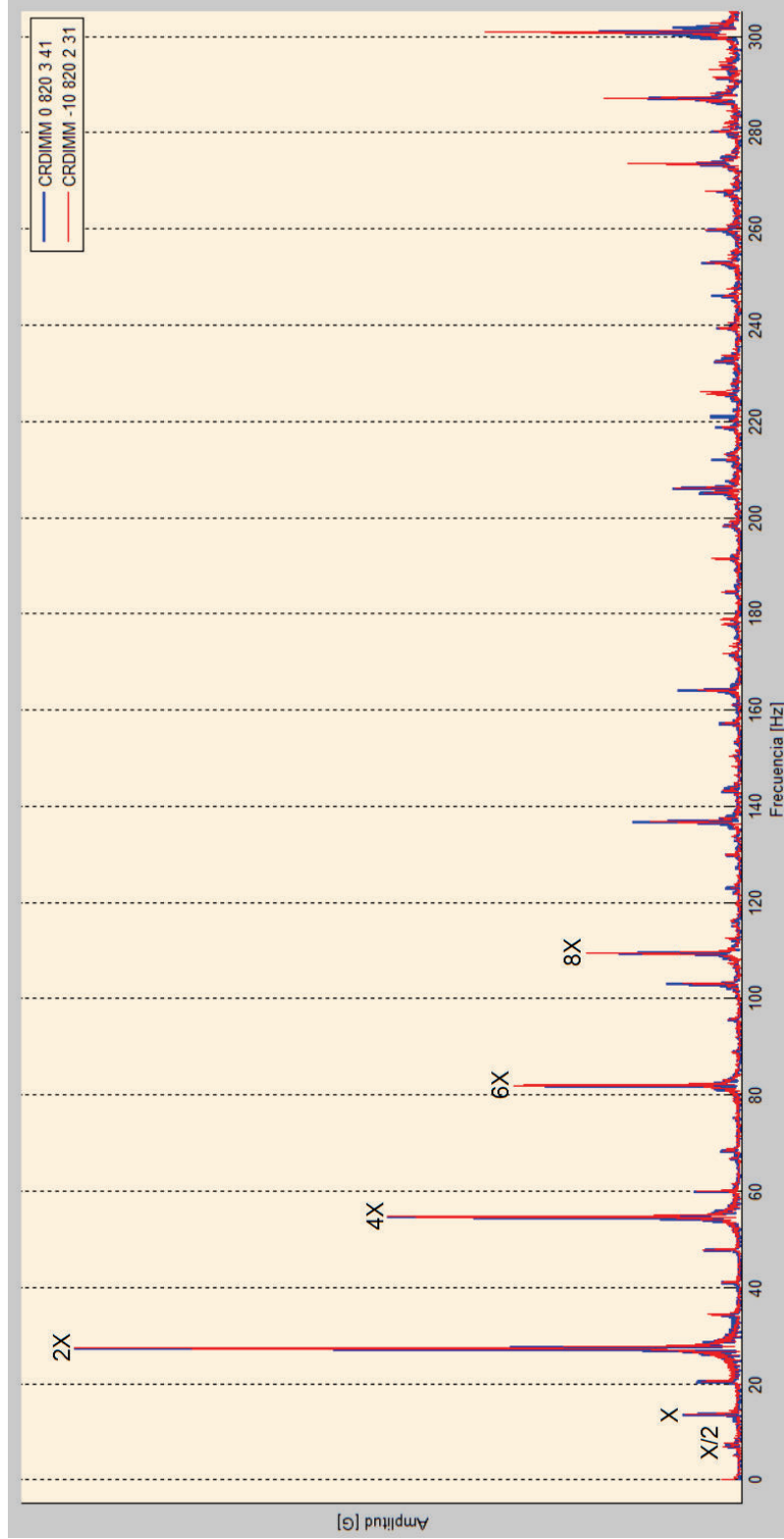


Figura 3.18. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 820 2 31

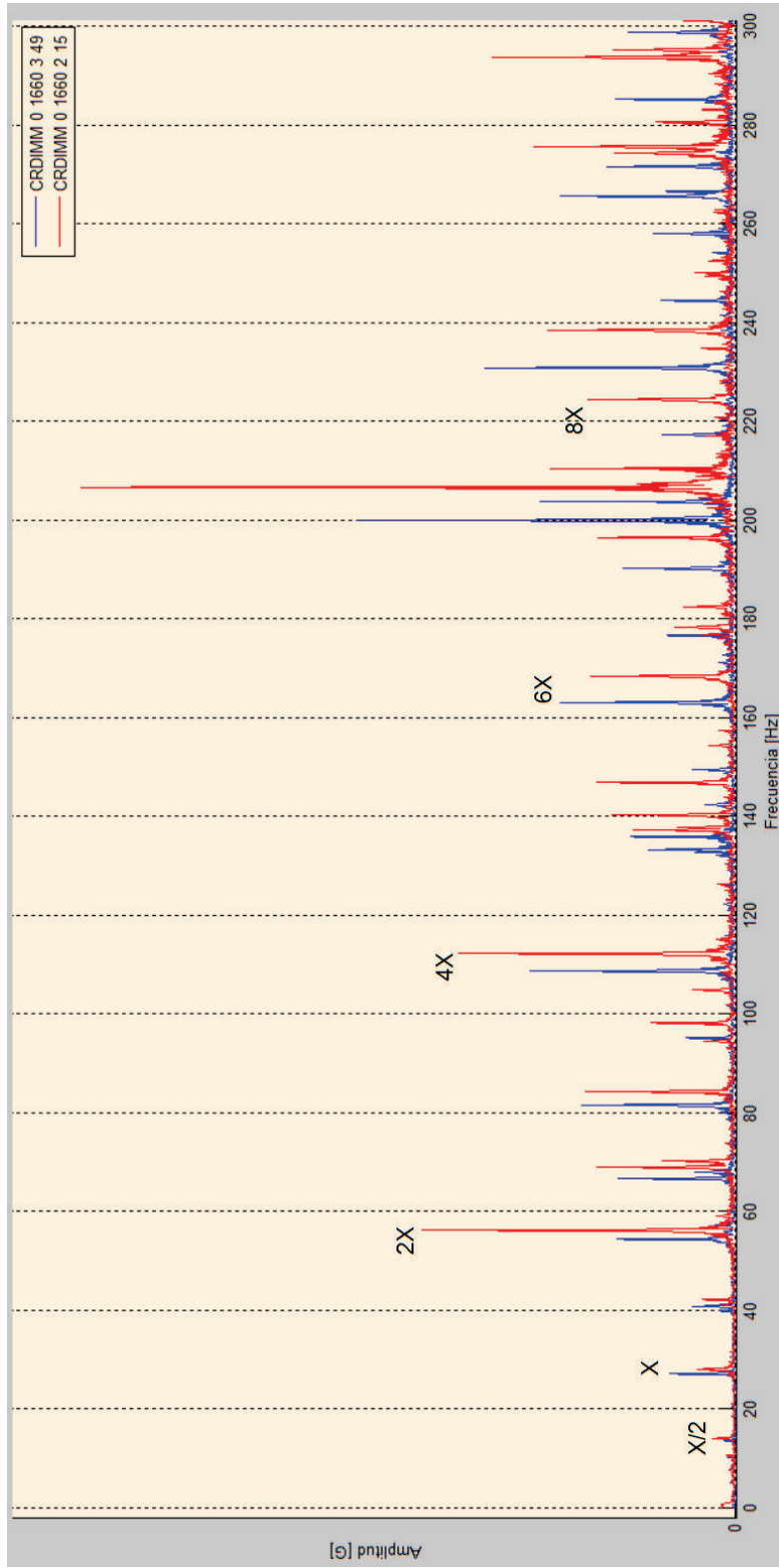


Figura 3.19. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDMM 0 1660 2 15

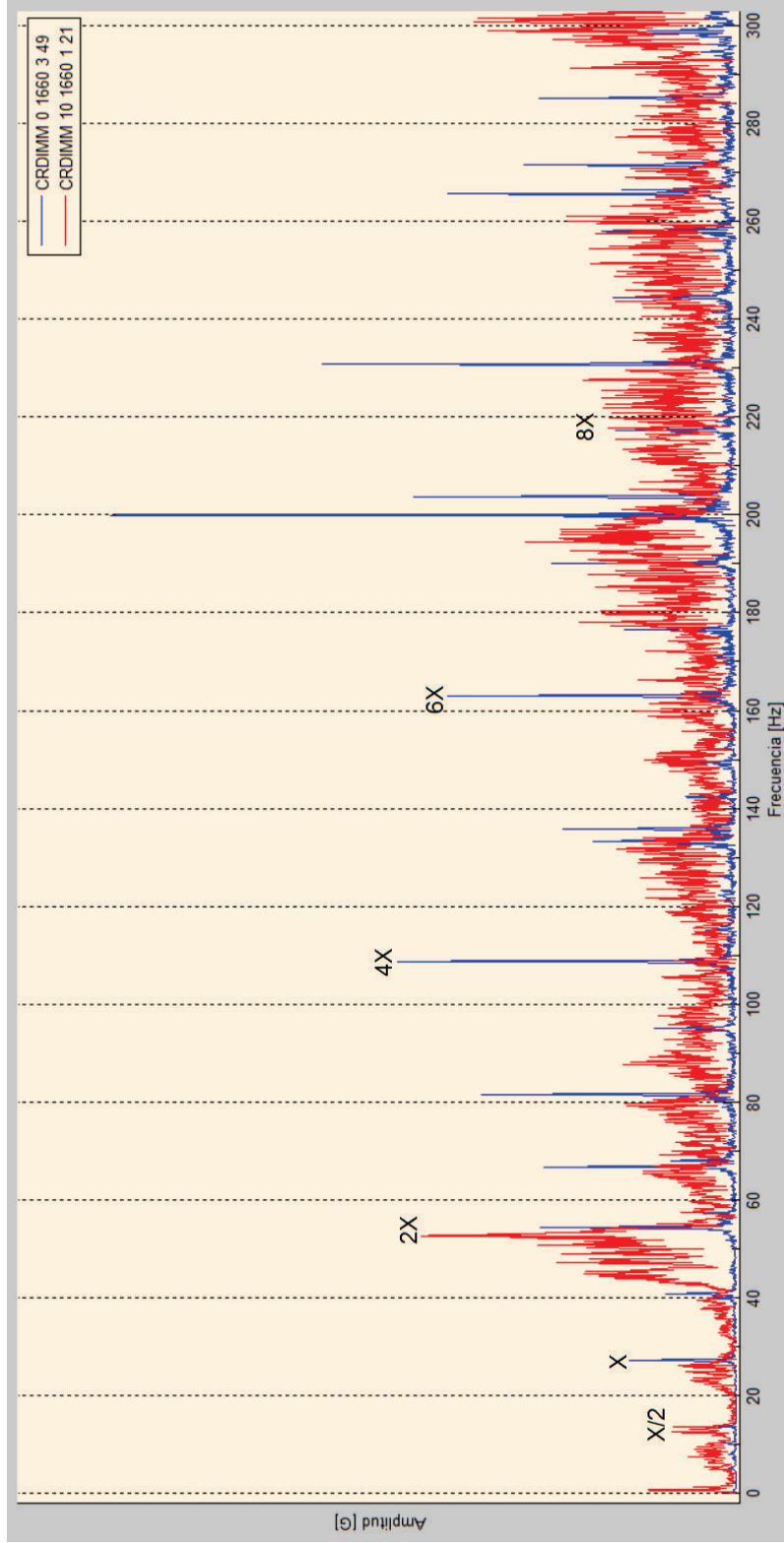


Figura 3.20. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDMM 10 1660 1 21

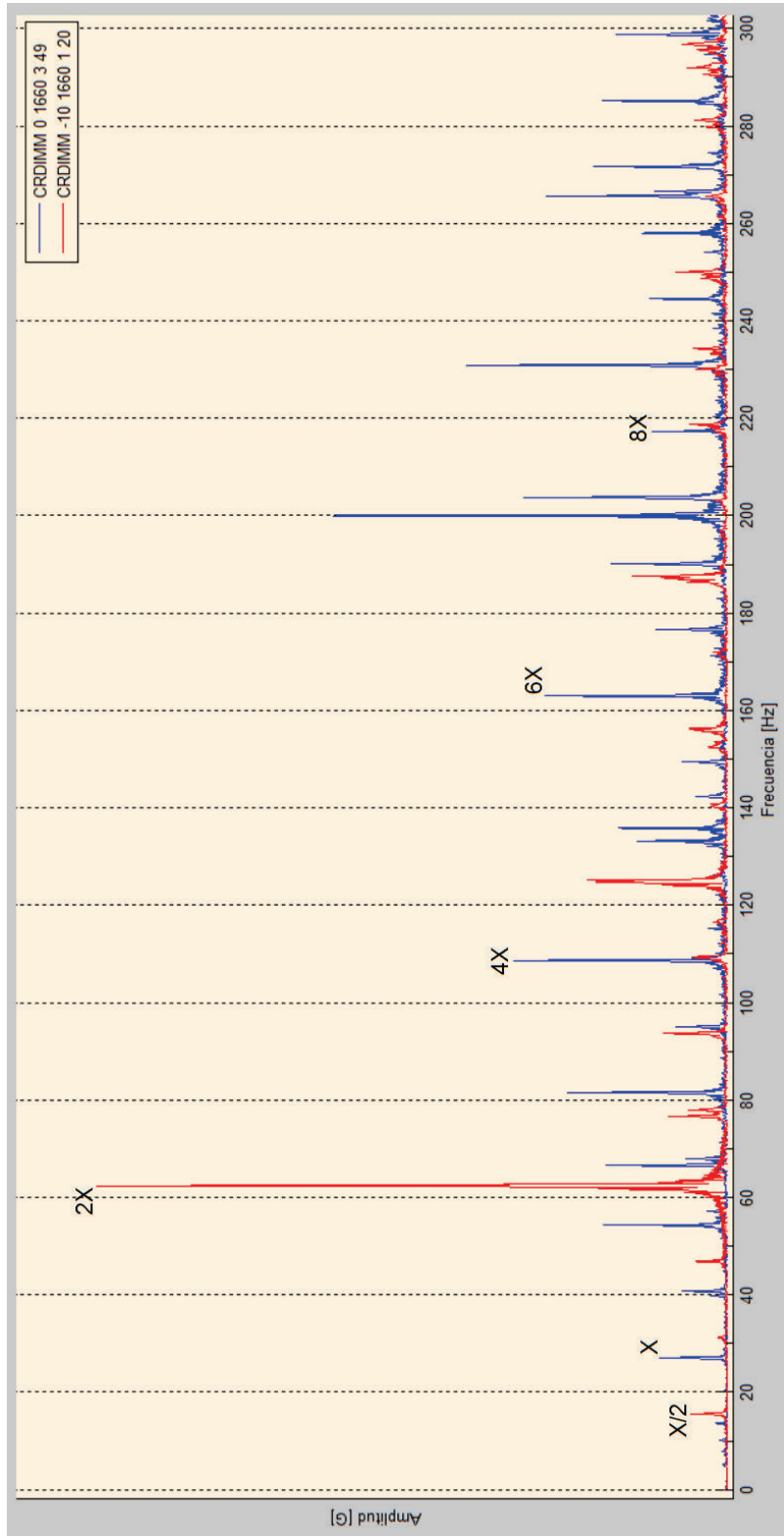


Figura 3.21. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 1660 1 20

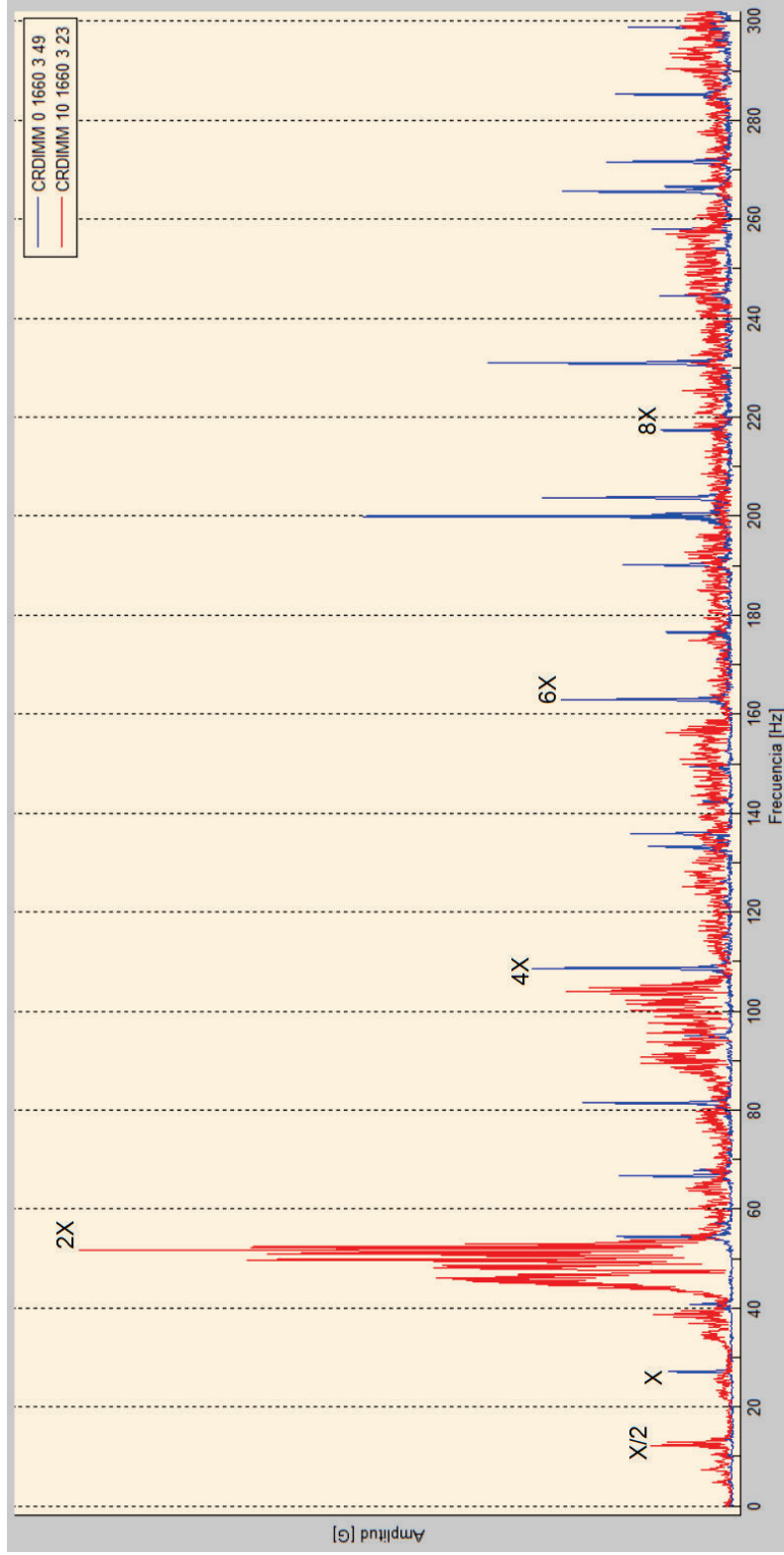


Figura 3.22. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDMM 10 1660 3 23

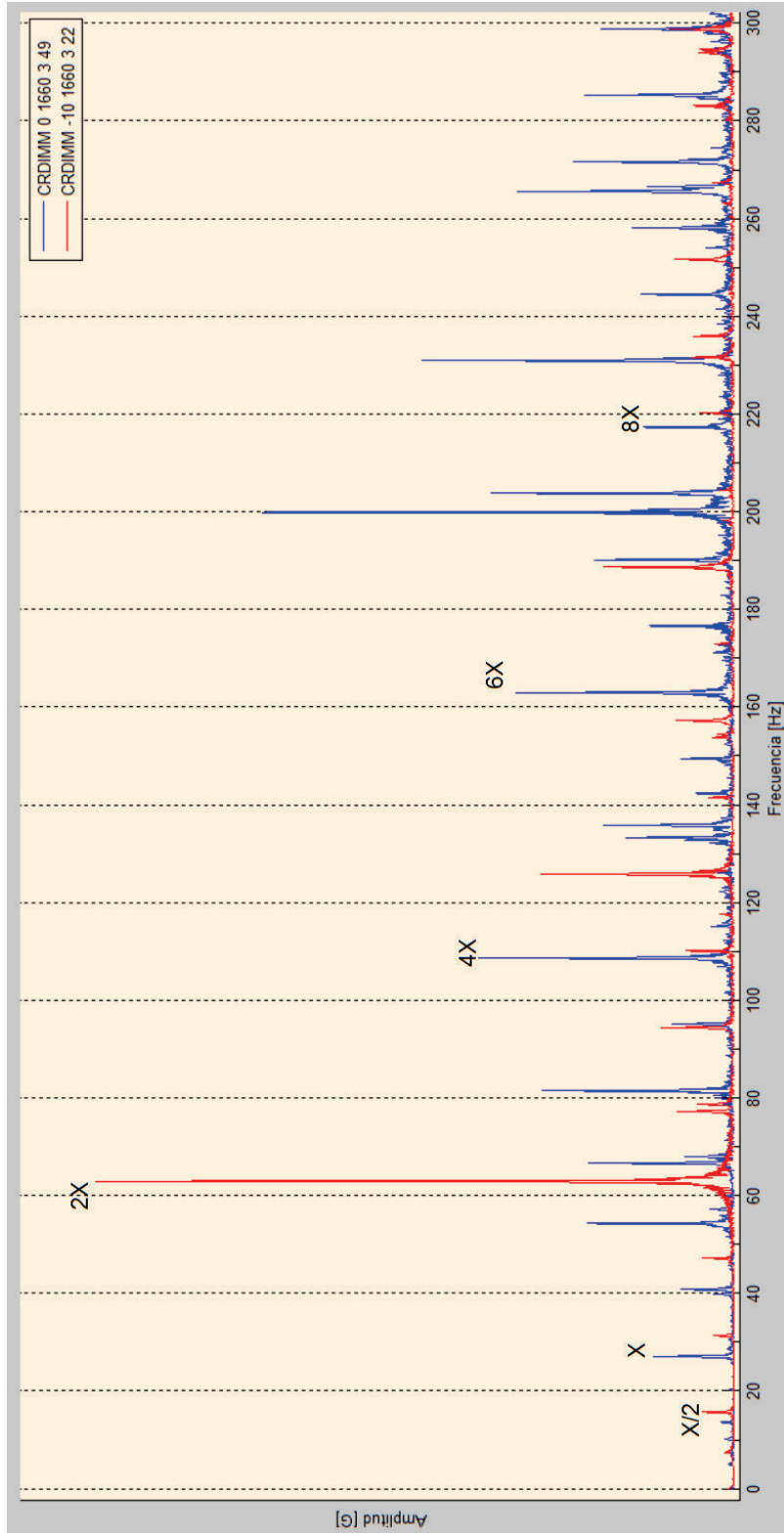


Figura 3.23. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 1660 3 22

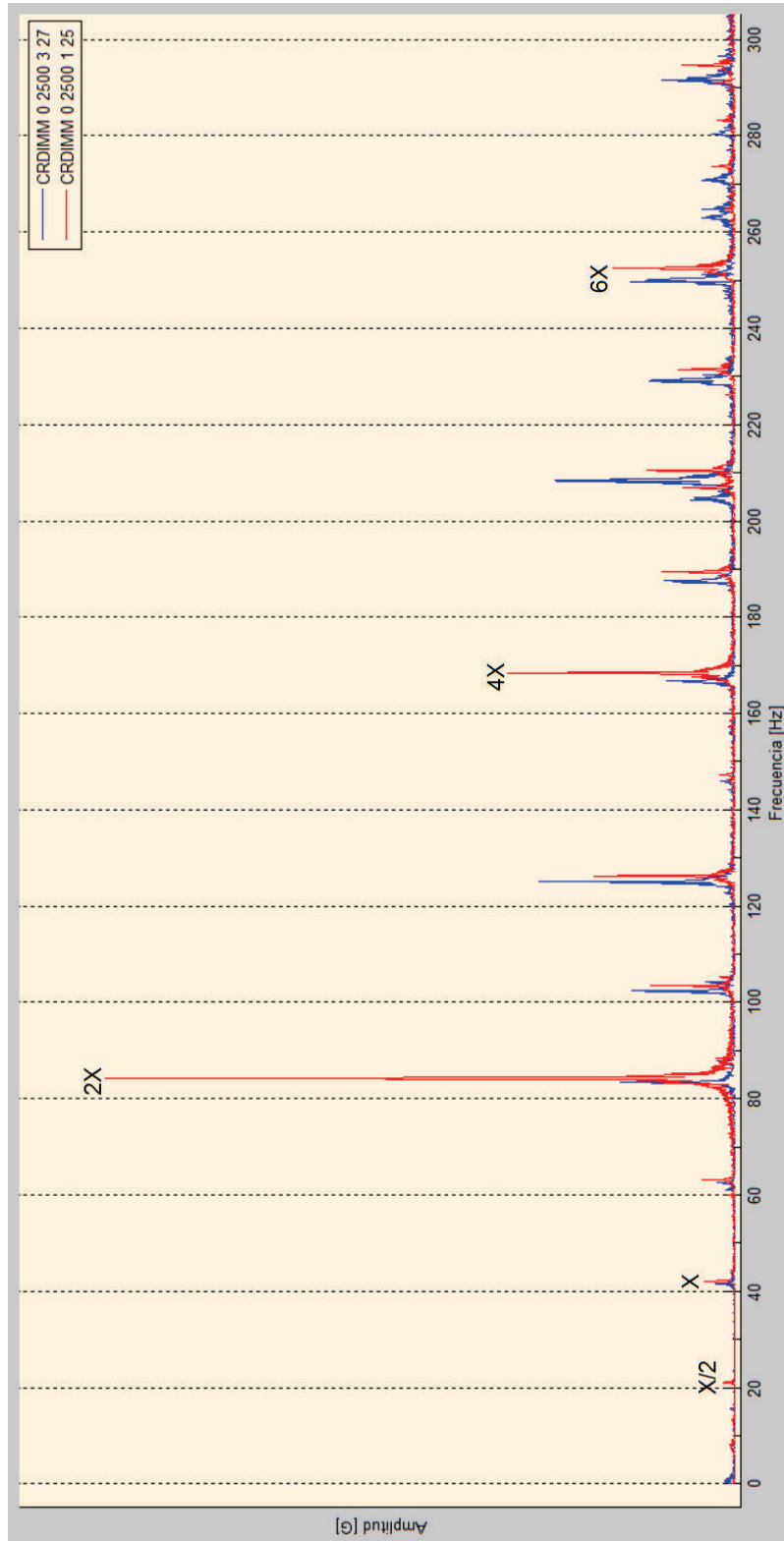


Figura 3.24. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 0 2500 1 25

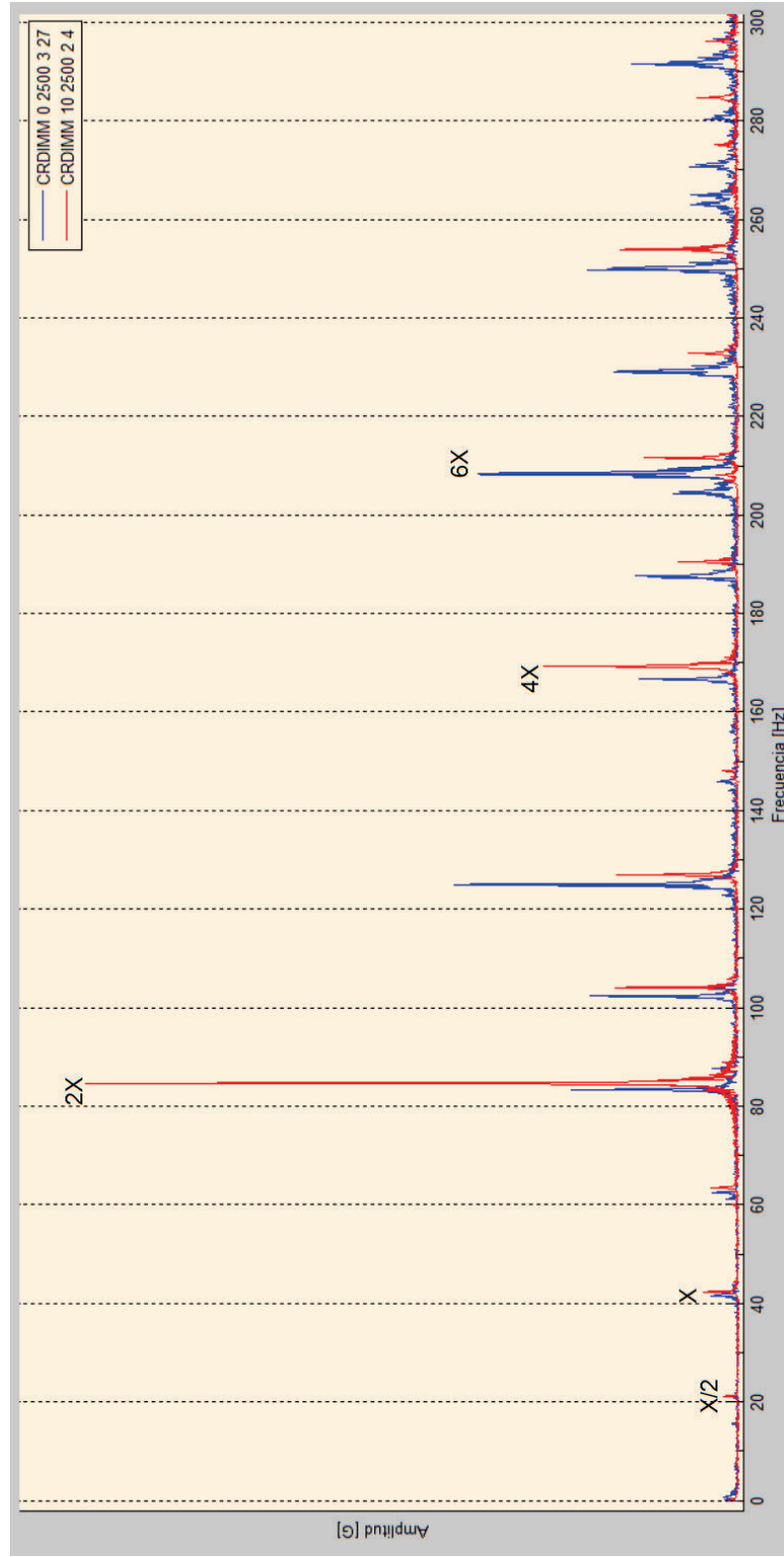


Figura 3.25. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM 10 2500 2 4

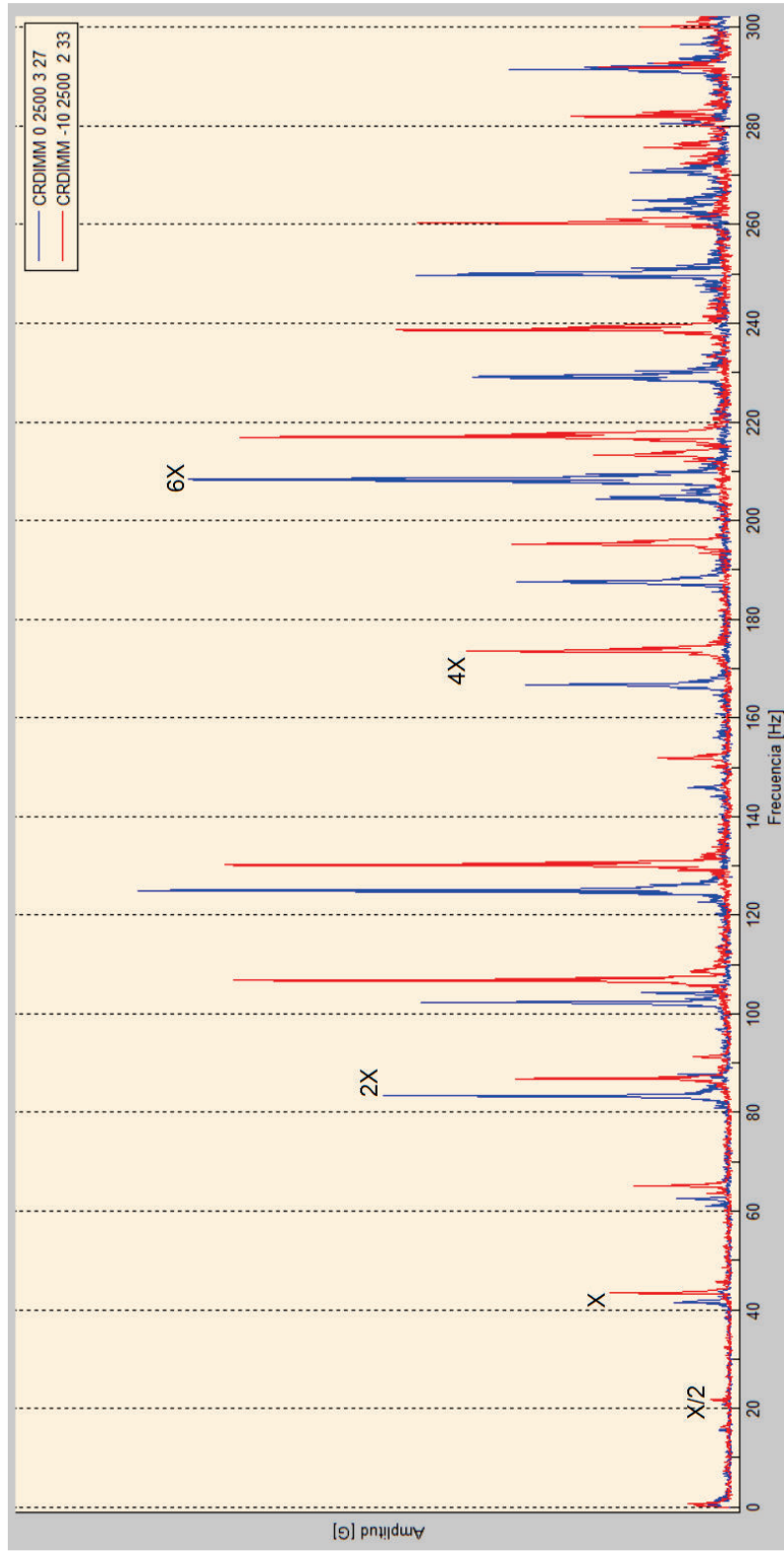


Figura 3.26. Gráfica de comparación entre espectro patrón y espectro de falla CRDIMM -10 2500 2 33

3.4.2.1 Análisis de frecuencia X/2

En la figura 3.27 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia X/2 a un régimen de giro de 820 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.3.

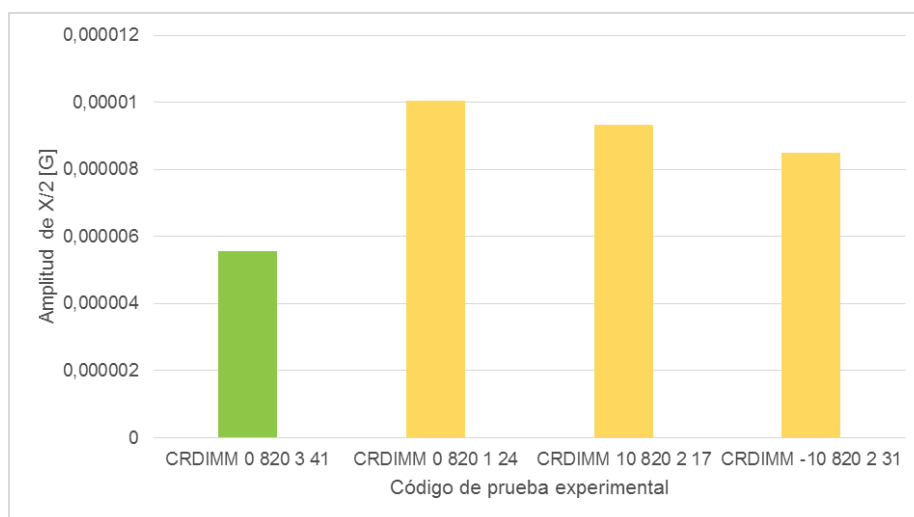


Figura 3.27. Amplitud de frecuencia X/2 a 820 rpm. ⁸⁹

Tabla 3.3 Resultados de la variación de frecuencia X/2 a 820 rpm. ⁹⁰

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 820 1 24	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6 %.	La amplitud se incrementa en un 80,6 %.
CRDIMM 10 820 2 17	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud se incrementa en un 67,6 %.

⁸⁹ Fuente: Los autores.

⁹⁰ Fuente: Los autores.

CRDIMM -10 820 2 31	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud se incrementa en un 53 %.
---------------------	---	---------------------------------------

En la figura 3.28 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia X/2 a un régimen de giro de 1660 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las cinco pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.4.

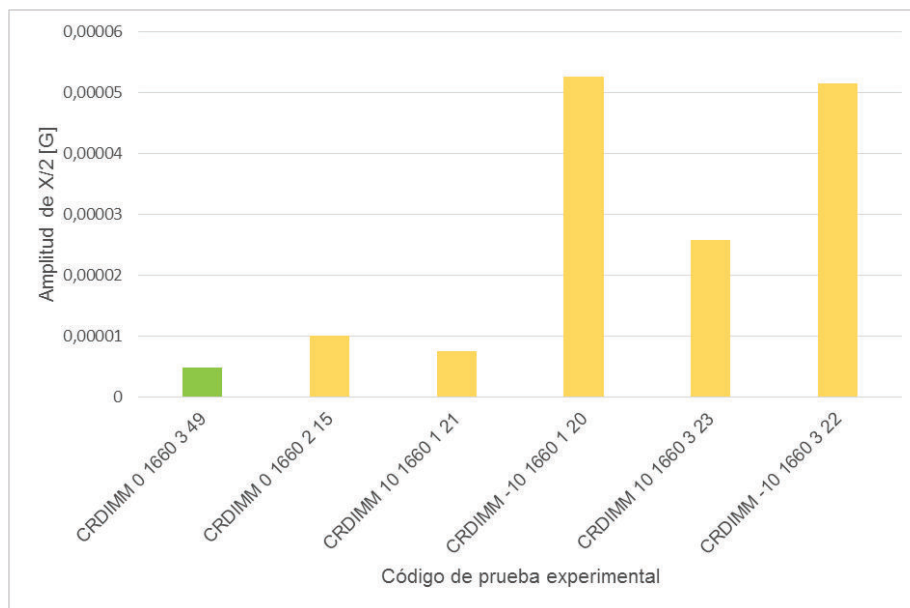


Figura 3.28. Amplitud de frecuencia X/2 a 1660 rpm.⁹¹

⁹¹ Fuente: Los autores.

Tabla 3.4 Resultados de la variación de frecuencia X/2 a 1660 rpm. ⁹²

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 1660 2 15	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 103,7 %.
CRDIMM 10 1660 1 21	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 52,6 %.
CRDIMM -10 1660 1 20	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 960,1 %.
CRDIMM 10 1660 3 23	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud se incrementa en un 422 %.
CRDIMM -10 1660 3 22	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud se incrementa en un 938,32 %.

En la figura 3.29 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia X/2 a un régimen de giro de 2500 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.5.

⁹² Fuente: Los autores.

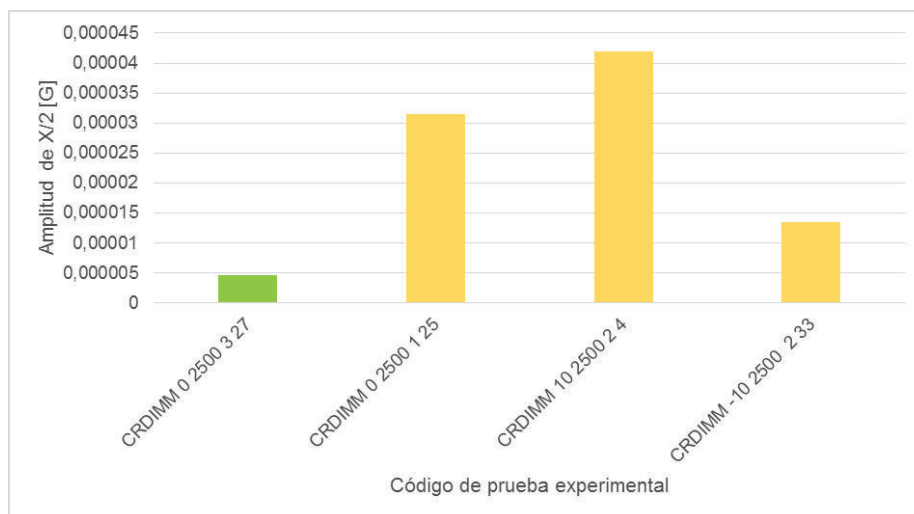


Figura 3.29. Amplitud de frecuencia X/2 a 2500 rpm. ⁹³

Tabla 3.5 Resultados de la variación de frecuencia X/2 a 2500 rpm. ⁹⁴

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 2500 1.25	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 587,3 %.
CRDIMM 10 2500 2.4	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 812 %.
CRDIMM -10 2500 2.33	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 191,9 %.

⁹³ Fuente: Los autores.

⁹⁴ Fuente: Los autores.

3.4.2.2 Análisis de frecuencia X

En la figura 3.30 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia X a un régimen de giro de 820 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.6.

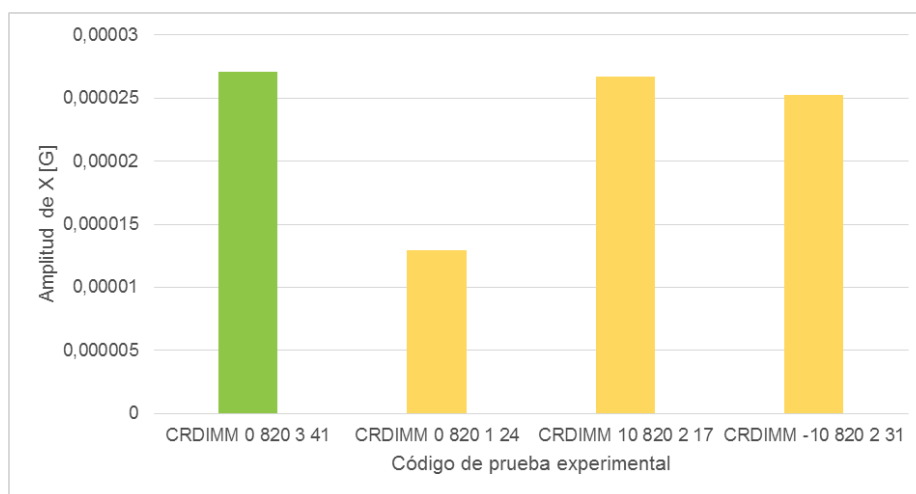


Figura 3.30. Amplitud de frecuencia X a 820 rpm. ⁹⁵

Tabla 3.6 Resultados de la variación de frecuencia X a 820 rpm. ⁹⁶

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 820 1 24	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6 %.	La amplitud disminuye en un 52,2 %.
CRDIMM 10 820 2 17	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud disminuye en un 1,2 %.

⁹⁵ Fuente: Los autores.

⁹⁶ Fuente: Los autores.

CRDIMM -10 820 2 31	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud disminuye en un 6,6 %.
---------------------	---	------------------------------------

En la figura 3.31 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia X a un régimen de giro de 1660 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las cinco pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.7.

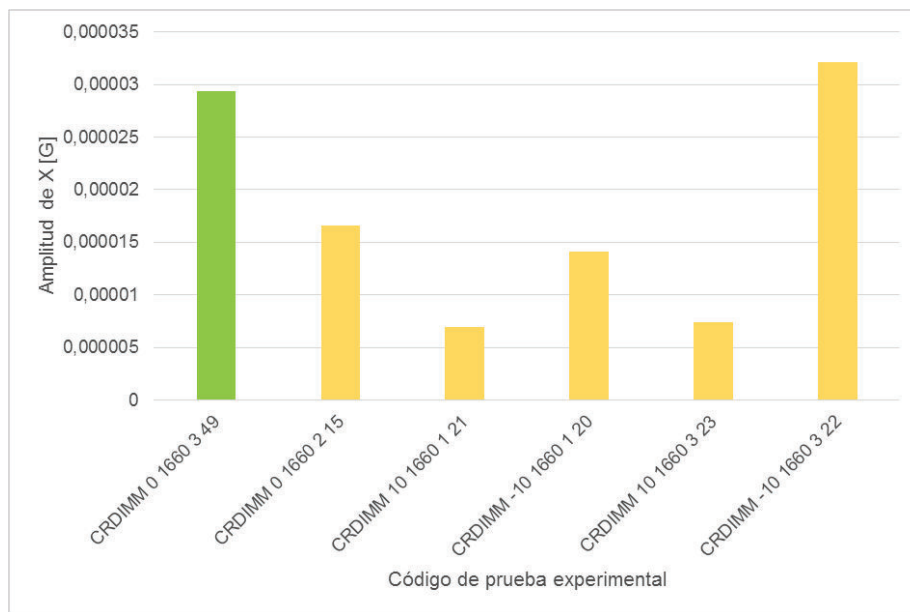


Figura 3.31. Amplitud de frecuencia X a 1660 rpm.⁹⁷

⁹⁷ Fuente: Los autores.

Tabla 3.7 Resultados de la variación de frecuencia X a 1660 rpm. ⁹⁸

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 1660 2 15	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud disminuye en un 43,6 %.
CRDIMM 10 1660 1 21	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 76,3 %.
CRDIMM -10 1660 1 20	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 51,8 %.
CRDIMM 10 1660 3 23	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud disminuye en un 74,9 %.
CRDIMM -10 1660 3 22	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud se incrementa en un 9 %.

En la figura 3.32 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia X a un régimen de giro de 2500 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.8.

⁹⁸ Fuente: Los autores.

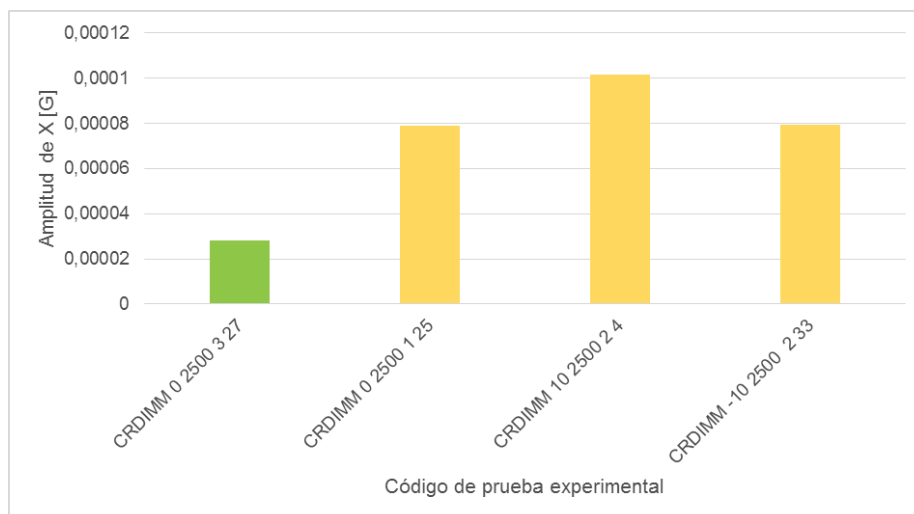


Figura 3.32. Amplitud de frecuencia X a 2500 rpm.⁹⁹

Tabla 3.8 Resultados de la variación de frecuencia X a 2500 rpm.¹⁰⁰

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 2500 1 25	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 178,5 %.
CRDIMM 10 2500 2 4	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 259,5 %.
CRDIMM -10 2500 2 33	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 180,1 %.

⁹⁹ Fuente: Los autores.

¹⁰⁰ Fuente: Los autores.

3.4.2.3 Análisis de frecuencia 2X

En la figura 3.33 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 2X a un régimen de giro de 820 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.9.

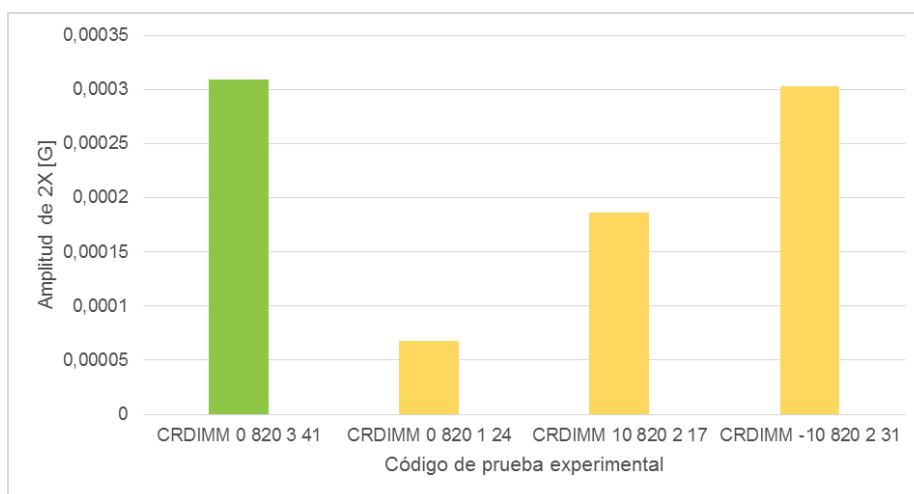


Figura 3.33. Amplitud de frecuencia 2X a 820 rpm. ¹⁰¹

Tabla 3.9 Resultados de la variación de frecuencia 2X a 820 rpm. ¹⁰²

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 820 1 24	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6 %.	La amplitud disminuye en un 78,1 %.
CRDIMM 10 820 2 17	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud disminuye en un 39,9 %.

¹⁰¹ Fuente: Los autores.

¹⁰² Fuente: Los autores.

CRDIMM -10 820 2 31	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud disminuye en un 2,2 %.
---------------------	---	------------------------------------

En la figura 3.34 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 2X a un régimen de giro de 1660 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las cinco pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.10.

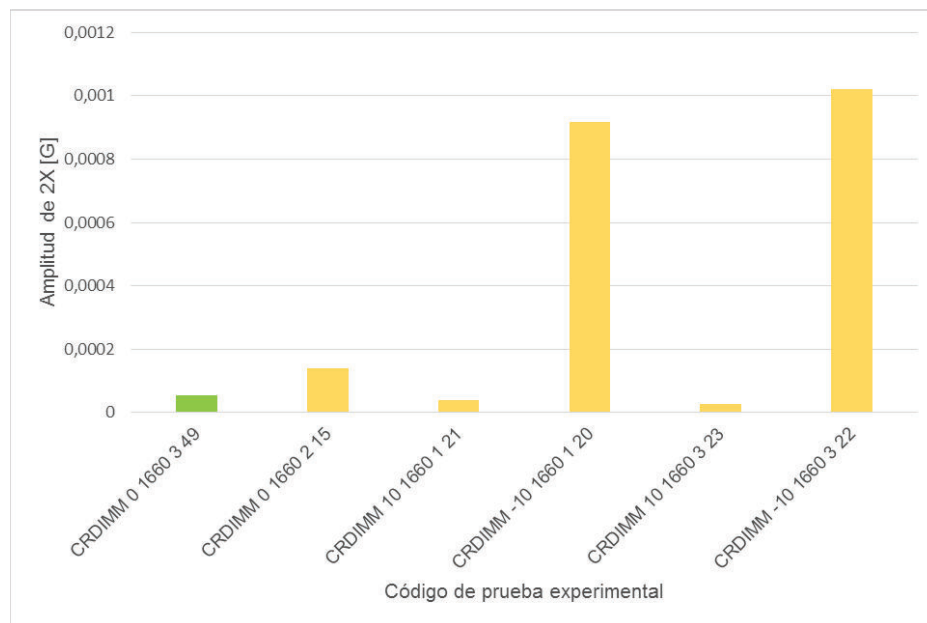


Figura 3.34. Amplitud de frecuencia 2X a 1660 rpm.¹⁰³

¹⁰³ Fuente: Los autores.

Tabla 3.10 Resultados de la variación de frecuencia 2X a 1660 rpm. ¹⁰⁴

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 1660 2 15	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 161,2 %.
CRDIMM 10 1660 1 21	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 29 %.
CRDIMM -10 1660 1 20	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 1615,4 %.
CRDIMM 10 1660 3 23	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud disminuye en un 51,5 %.
CRDIMM -10 1660 3 22	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud se incrementa en un 1808,5 %.

En la figura 3.35 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 2X a un régimen de giro de 2500 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.11.

¹⁰⁴ Fuente: Los autores.

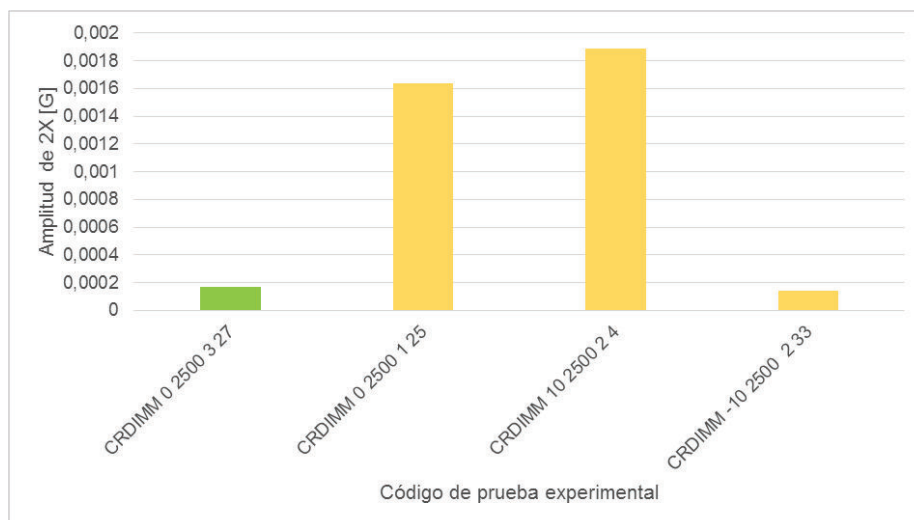


Figura 3.35. Amplitud de frecuencia 2X a 2500 rpm. ¹⁰⁵

Tabla 3.11 Resultados de la variación de frecuencia 2X a 2500 rpm. ¹⁰⁶

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 2500 1 25	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 853,9 %.
CRDIMM 10 2500 2 4	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 1002 %.
CRDIMM -10 2500 2 33	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud disminuye en un 17,8 %.

¹⁰⁵ Fuente: Los autores.

¹⁰⁶ Fuente: Los autores.

3.4.2.4 Análisis de frecuencia 4X

En la figura 3.36 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 4X a un régimen de giro de 820 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.12.

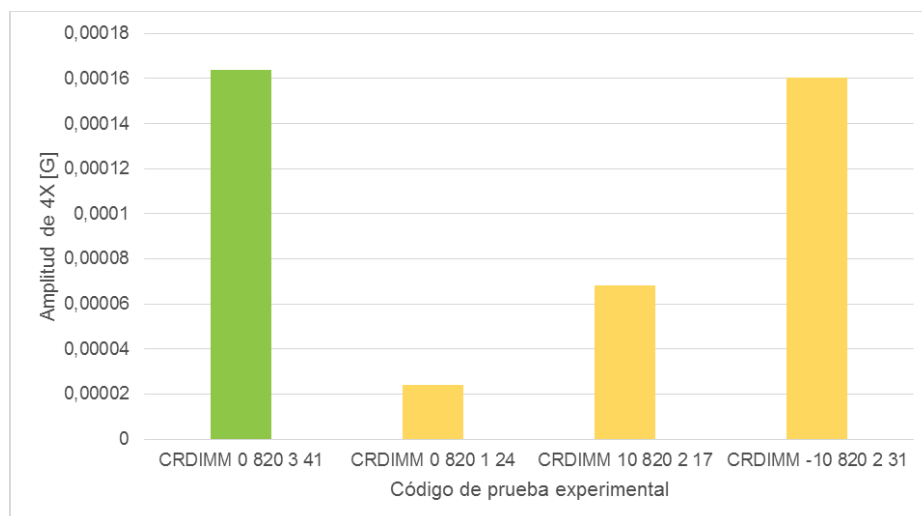


Figura 3.36. Amplitud de frecuencia 4X a 820 rpm. ¹⁰⁷

Tabla 3.12 Resultados de la variación de frecuencia 4X a 820 rpm. ¹⁰⁸

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 820 1 24	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6 %.	La amplitud disminuye en un 85,4 %.
CRDIMM 10 820 2 17	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud disminuye en un 58,5 %.
CRDIMM -10 820 2 31	Fallo en el motor con variación de presión en el	La amplitud disminuye en un

¹⁰⁷ Fuente: Los autores.

¹⁰⁸ Fuente: Los autores.

	riel de menos 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	2 %.
--	--	------

En la figura 3.37 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 4X a un régimen de giro de 1660 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las cinco pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.13.

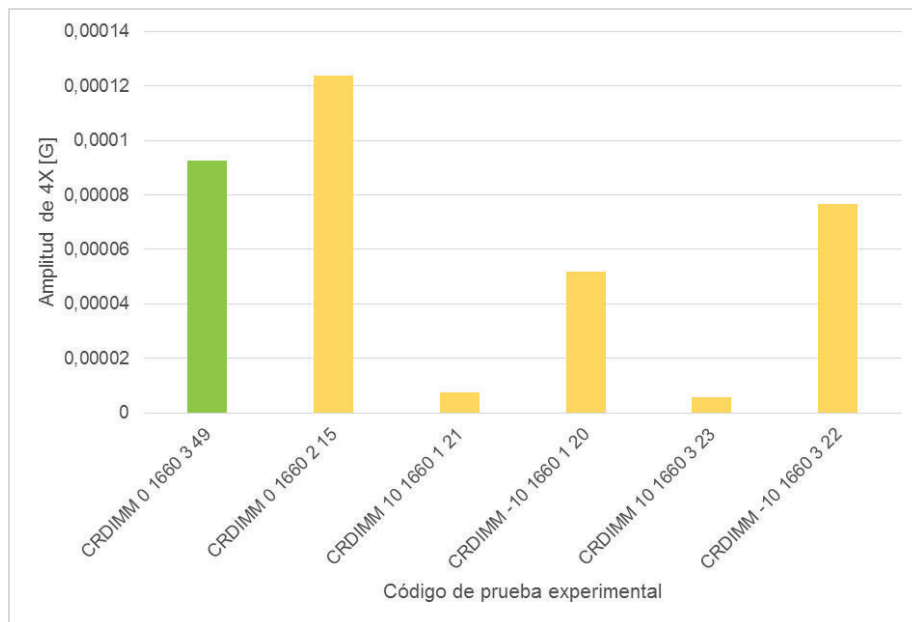


Figura 3.37. Amplitud de frecuencia 4X a 1660 rpm.¹⁰⁹

¹⁰⁹ Fuente: Los autores.

Tabla 3.13 Resultados de la variación de frecuencia 4X a 1660 rpm. ¹¹⁰

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 1660 2 15	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 33,46 %.
CRDIMM 10 1660 1 21	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 92 %.
CRDIMM -10 1660 1 20	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 44,2 %.
CRDIMM 10 1660 3 23	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud disminuye en un 93,8 %.
CRDIMM -10 1660 3 22	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud disminuye en un 17,2 %.

En la figura 3.38 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 4X a un régimen de giro de 2500 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.14.

¹¹⁰ Fuente: Los autores.

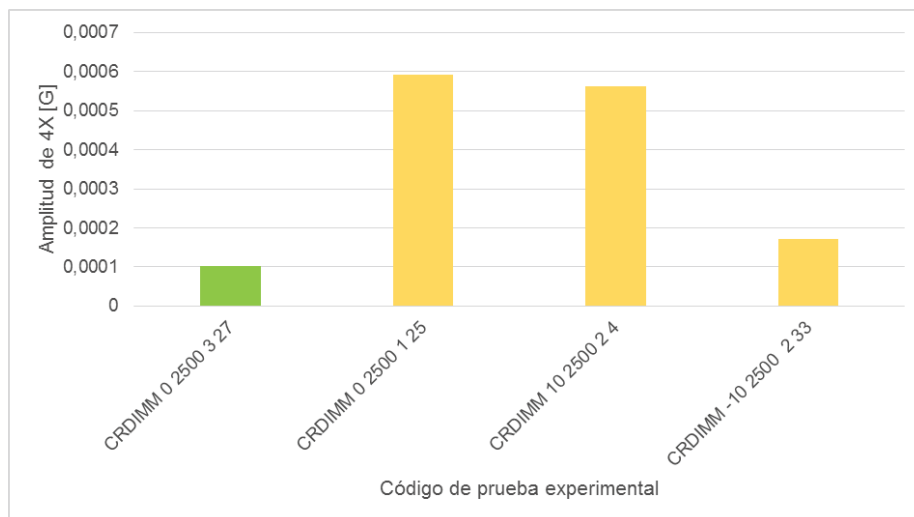


Figura 3.38. Amplitud de frecuencia 4X a 2500 rpm. ¹¹¹

Tabla 3.14 Resultados de la variación de frecuencia 4X a 2500 rpm. ¹¹²

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 2500 1 25	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 481,8 %.
CRDIMM 10 2500 2 4	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 454,4 %.
CRDIMM -10 2500 2 33	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 69,8 %.

¹¹¹ Fuente: Los autores.

¹¹² Fuente: Los autores.

3.4.2.5 Análisis de frecuencia 6X.

En la figura 3.39 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 6X a un régimen de giro de 820 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.15.

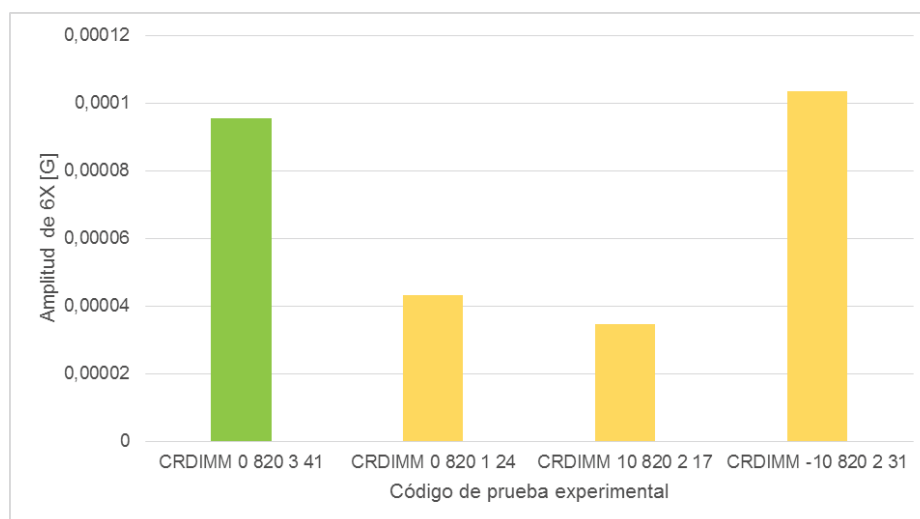


Figura 3.39. Amplitud de frecuencia 6X a 820 rpm. ¹¹³

Tabla 3.15 Resultados de la variación de frecuencia 6X a 820 rpm. ¹¹⁴

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 820 1 24	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6 %.	La amplitud disminuye en un 54,9 %.
CRDIMM 10 820 2 17	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud disminuye en un 63,7 %.

¹¹³ Fuente: Los autores.

¹¹⁴ Fuente: Los autores.

CRDIMM -10 820 2 31	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud se incrementa en un 8,1 %.
---------------------	---	--

En la figura 3.40 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 6X a un régimen de giro de 1660 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las cinco pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.16.

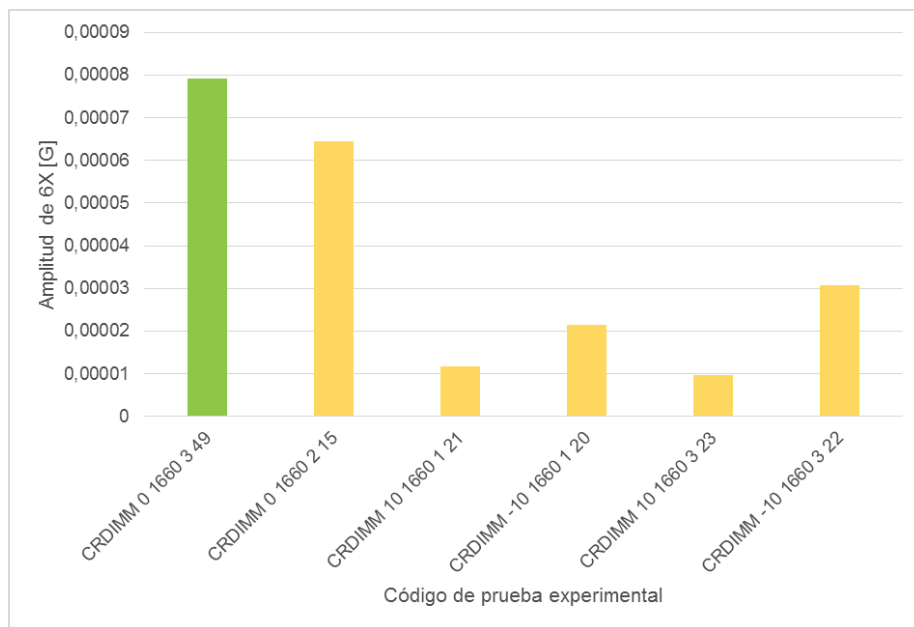


Figura 3.40. Amplitud de frecuencia 6X a 1660 rpm.¹¹⁵

¹¹⁵ Fuente: Los autores.

Tabla 3.16 Resultados de la variación de frecuencia 6X a 1660 rpm. ¹¹⁶

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 1660 2 15	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud disminuye en un 18,5 %.
CRDIMM 10 1660 1 21	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 85 %.
CRDIMM -10 1660 1 20	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 72,9 %.
CRDIMM 10 1660 3 23	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud disminuye en un 87,7 %.
CRDIMM -10 1660 3 22	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud disminuye en un 61,2 %.

En la figura 3.41 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 6X a un régimen de giro de 2500 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.17.

¹¹⁶ Fuente: Los autores.

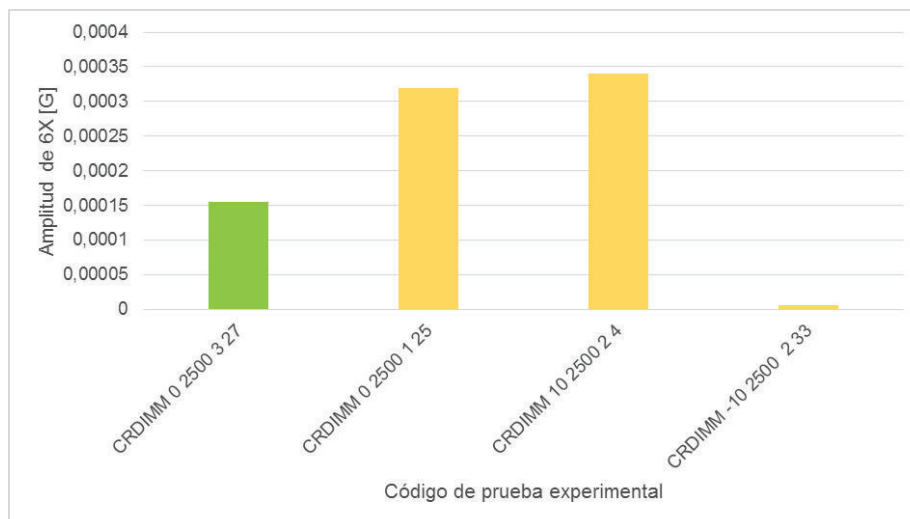


Figura 3.41. Amplitud de frecuencia 6X a 2500 rpm. ¹¹⁷

Tabla 3.17 Resultados de la variación de frecuencia 6X a 2500 rpm. ¹¹⁸

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 2500 1 25	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 104,8 %.
CRDIMM 10 2500 2 4	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud se incrementa en un 118,8 %.
CRDIMM -10 2500 2 33	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud disminuye en un 95,9 %.

¹¹⁷ Fuente: Los autores.

¹¹⁸ Fuente: Los autores.

3.4.2.6 Análisis de frecuencia 8X

En la figura 3.42 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 8X a un régimen de giro de 820 rpm. Se presenta los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las tres pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.18.

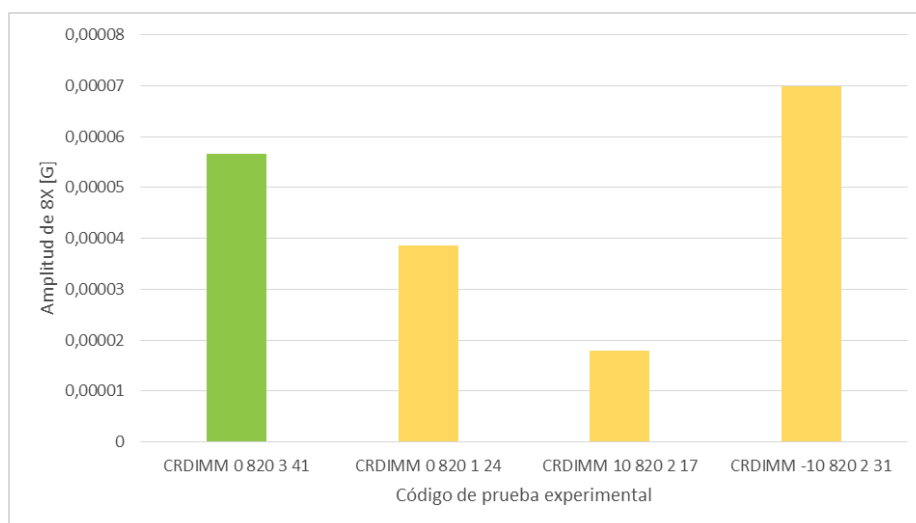


Figura 3.42. Amplitud de frecuencia 8X a 820 rpm. ¹¹⁹

Tabla 3.18 Resultados de la variación de frecuencia 8X a 820 rpm. ¹²⁰

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 820 1 24	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6 %.	La amplitud disminuye en un 31,9 %.
CRDIMM 10 820 2 17	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud disminuye en un 68,4 %.

¹¹⁹ Fuente: Los autores.

¹²⁰ Fuente: Los autores.

CRDIMM -10 820 2 31	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %.	La amplitud se incrementa en un 23,5 %.
---------------------	---	---

En la figura 3.43 se aprecia la variación de la amplitud de la frecuencia 8X a un régimen de giro de 1660 rpm. Se presentan los resultados al comparar la amplitud en condiciones normales con las amplitudes que se obtienen en las cinco pruebas experimentales con diferentes fallos simulados en el motor, en la tabla 3.19.

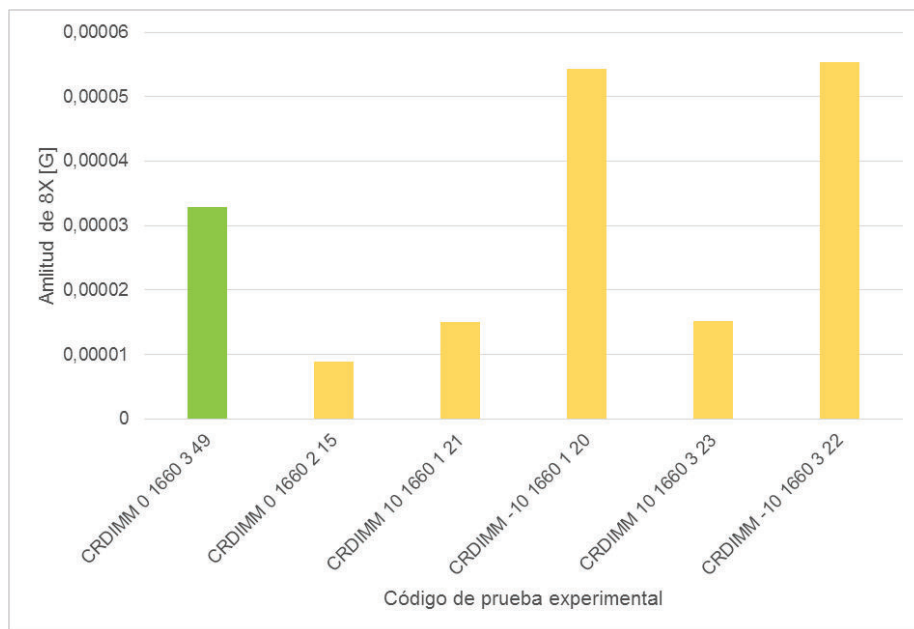


Figura 3.43. Amplitud de frecuencia 8X a 1660 rpm.¹²¹

¹²¹ Fuente: Los autores.

Tabla 3.19 Resultados de la variación de frecuencia 8X a 1660 rpm. ¹²²

Código	Descripción	Resultados
CRDIMM 0 1660 2 15	Fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8%.	La amplitud disminuye en un 72,9 %.
CRDIMM 10 1660 1 21	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud disminuye en un 54,3 %.
CRDIMM -10 1660 1 20	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%.	La amplitud se incrementa en un 64,7 %.
CRDIMM 10 1660 3 23	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de más 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud disminuye en un 54 %.
CRDIMM -10 1660 3 22	Fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100%.	La amplitud se incrementa en un 68,1 %.

¹²² Fuente: Los autores.

3.4.3 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES MÁS INFLUYENTES EN LAS VARIABLES DE RESPUESTA

En este punto se determina cuáles son los factores o la combinación de los mismos que mayor incidencia tienen en cada una de las variables de respuesta, que se obtienen en las pruebas experimentales realizadas en el motor. Para determinar cuáles son estos factores o combinaciones de estos, se utiliza el método de diagrama de Pareto de los efectos, en cada una de las variables de respuesta con un nivel de significancia de 0,05, para obtener este diagrama se utiliza el programa estadístico Minitab®.

Para los diagramas de Pareto de los efectos se mantiene una nomenclatura que se muestra en la tabla 3.20.

Tabla 3.20 Nomenclatura utilizada en los diagramas de Pareto de los efectos.¹²³

Descripción del factor	Nomenclatura	Nombre
Presión de inyección en el riel.	A	Presión
Régimen de giro	B	RPM
Estado físico del inyector.	C	Inyector

3.4.3.1 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la potencia

Para la potencia, se puede apreciar en la figura 3.44 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la presión en el riel y la combinación de estos dos factores.

3.4.3.2 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la asimetría

Para la asimetría, se puede apreciar en la figura 3.45 que la combinación de los factores régimen de giro y estado físico del inyector tienen la influencia más alta,

¹²³ Fuente: Los autores.

mientras que el resto de factores o sus combinaciones no poseen una mayor influencia.

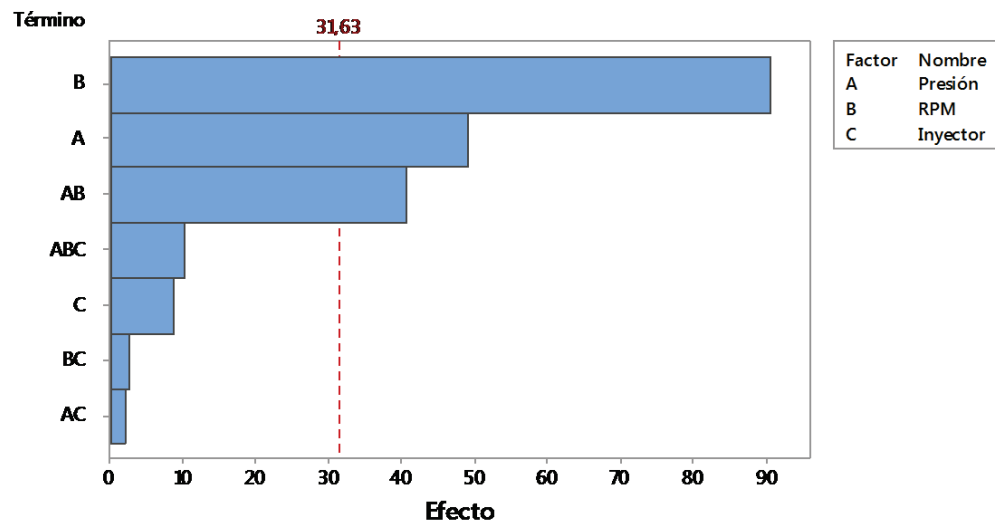


Figura 3.44. Diagrama de Pareto de los efectos para la potencia. ¹²⁴

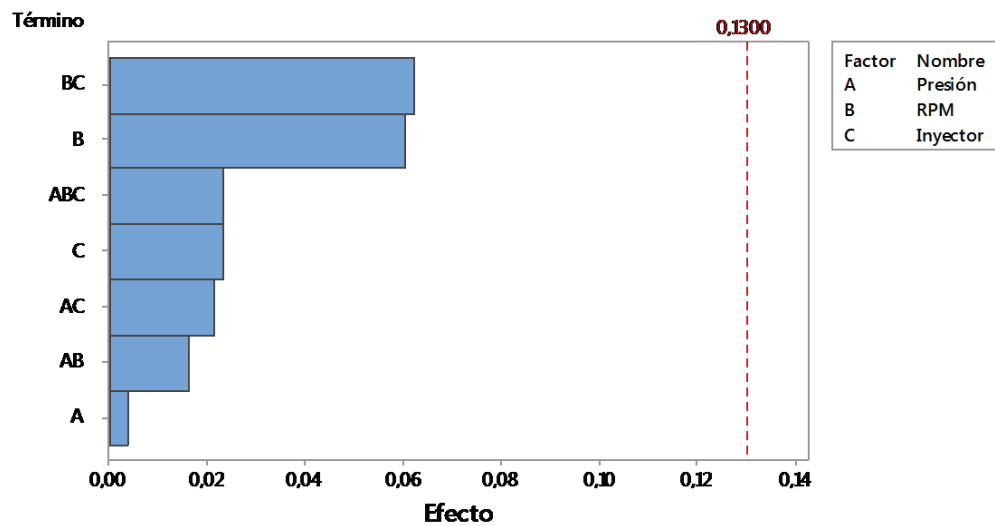


Figura 3.45. Diagrama de Pareto de los efectos para la asimetría. ¹²⁵

¹²⁴ Fuente: Los autores.

¹²⁵ Fuente: Los autores.

3.4.3.3 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para curtosis

Para curtosis, se puede apreciar en la figura 3.46 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la combinación de los factores régimen de giro y estado físico del inyector, el factor de presión en el riel tiene una influencia menor a los dos anteriores.

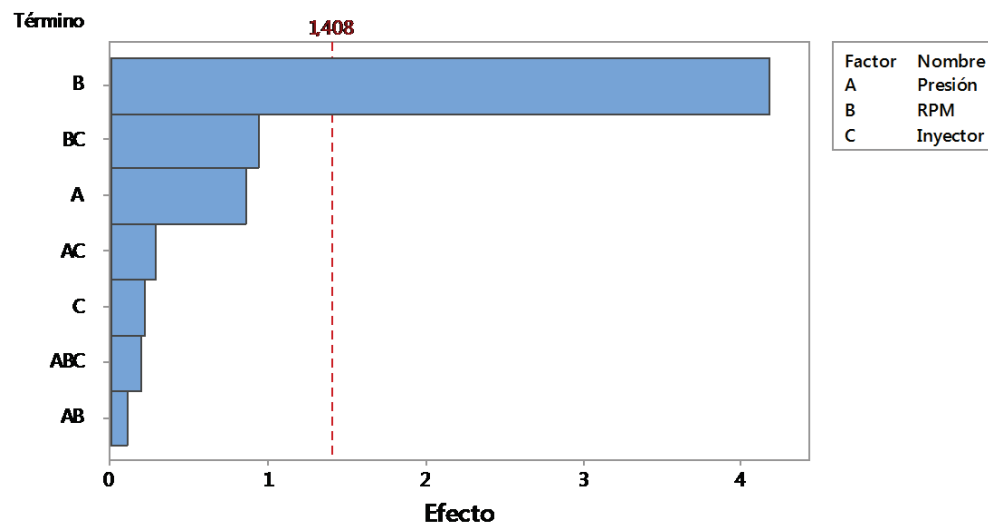


Figura 3.46. Diagrama de Pareto de los efectos para curtosis. ¹²⁶

3.4.3.4 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la mediana

Para la mediana, se puede apreciar en la figura 3.47 que la combinación de los factores régimen de giro y estado físico del inyector tienen la influencia más alta, seguido del factor estado físico del inyector, mientras que el resto de factores o sus combinaciones no poseen una mayor influencia.

¹²⁶ Fuente: Los autores.

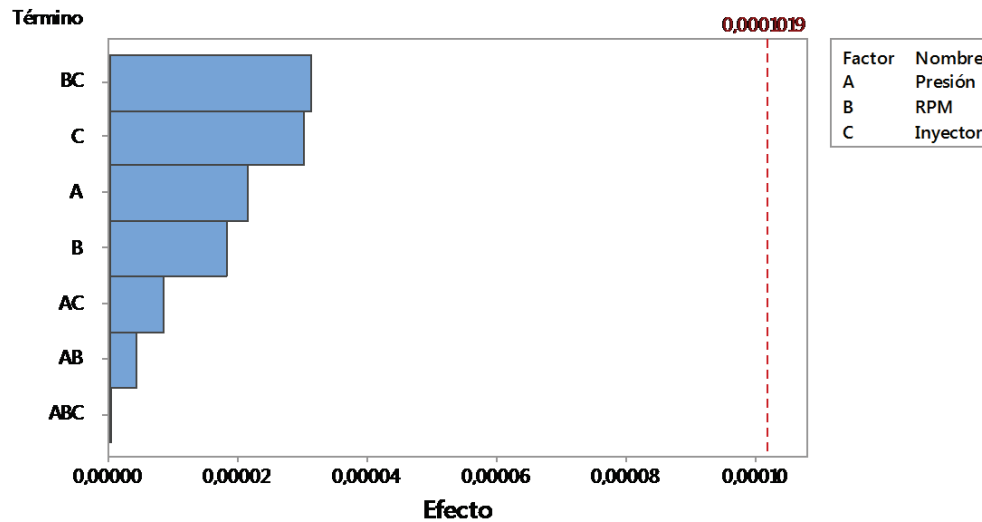


Figura 3.47. Diagrama de Pareto de los efectos para la mediana. ¹²⁷

3.4.3.5 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la moda

Para la moda, se puede apreciar en la figura 3.48 que la combinación de los factores presión en el riel y régimen de giro tienen la influencia más alta, seguido del factor régimen de giro, mientras que el resto de factores o sus combinaciones no poseen una mayor influencia.

3.4.3.6 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de RMS

Para el valor de RMS, se puede apreciar en la figura 3.49 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido del factor de presión en el riel y la combinación de estos dos factores.

¹²⁷ Fuente: Los autores.

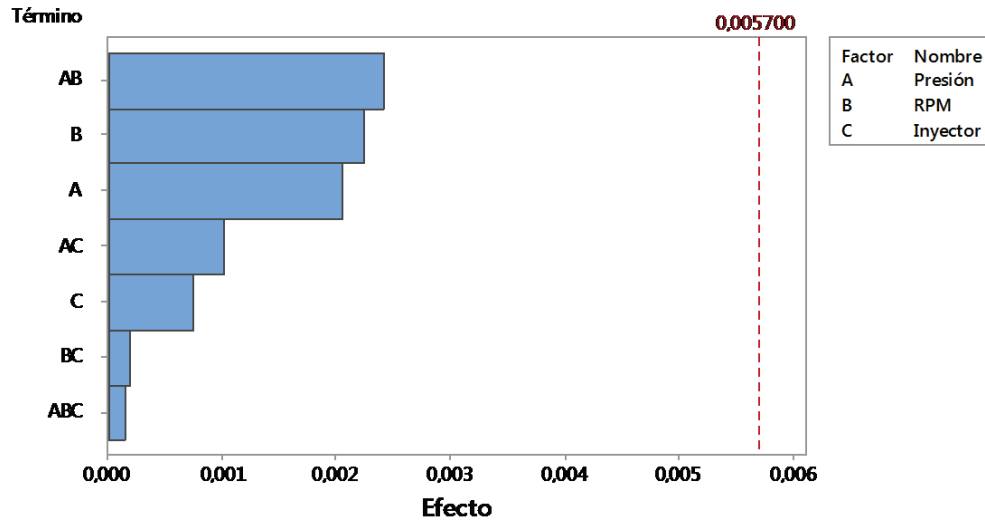


Figura 3.48. Diagrama de Pareto de los efectos para la moda. ¹²⁸

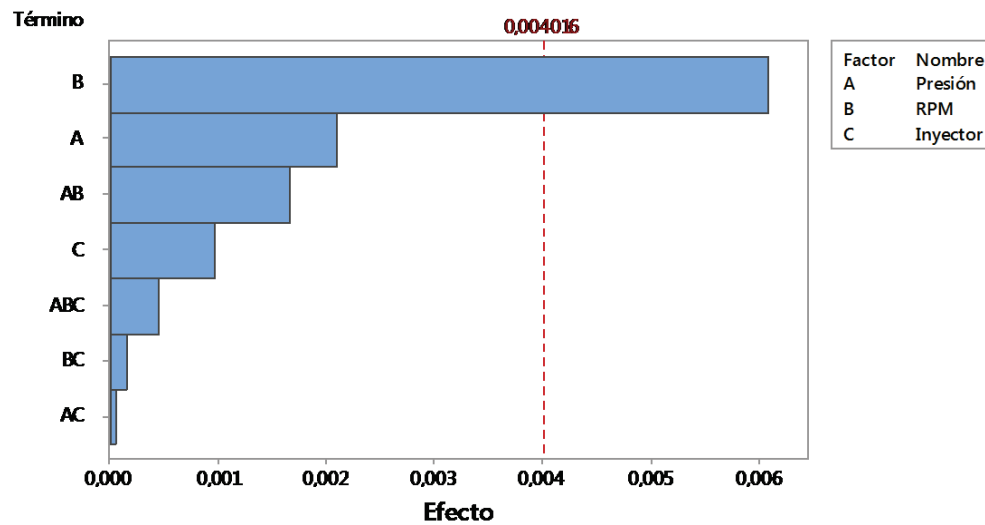


Figura 3.49. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de RMS. ¹²⁹

¹²⁸ Fuente: Los autores.

¹²⁹ Fuente: Los autores.

3.4.3.7 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el factor de cresta

Para el factor de cresta, se puede apreciar en la figura 3.50 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la combinación de los factores presión en el riel y estado físico del inyector, el factor estado físico del inyector tiene una influencia menor a los dos anteriores.

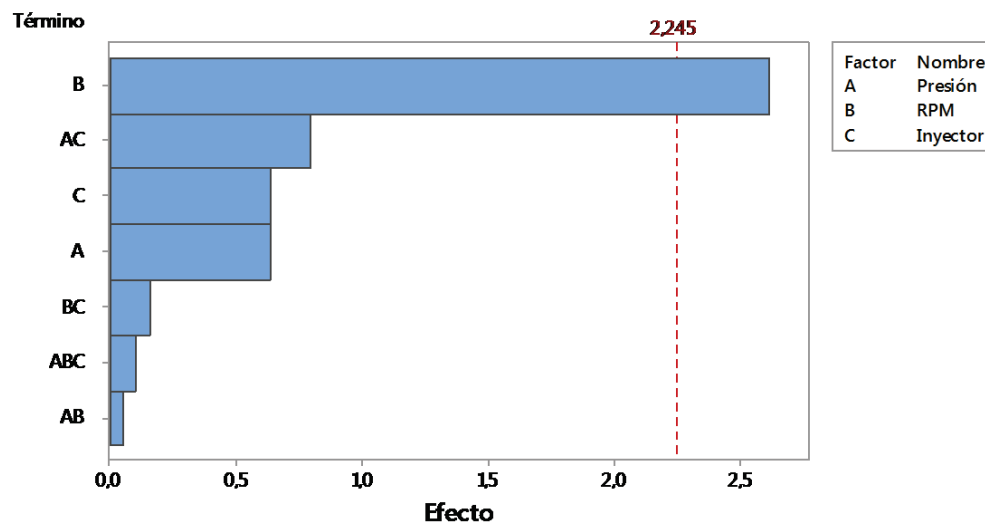


Figura 3.50. Diagrama de Pareto de los efectos para el factor de cresta. ¹³⁰

3.4.3.8 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la media

Para la media, se puede apreciar en la figura 3.51 que el factor de mayor influencia es la presión en el riel, seguido de la combinación de los factores régimen de giro y estado físico del inyector, mientras que el resto de factores o sus combinaciones no poseen una mayor influencia.

¹³⁰ Fuente: Los autores.

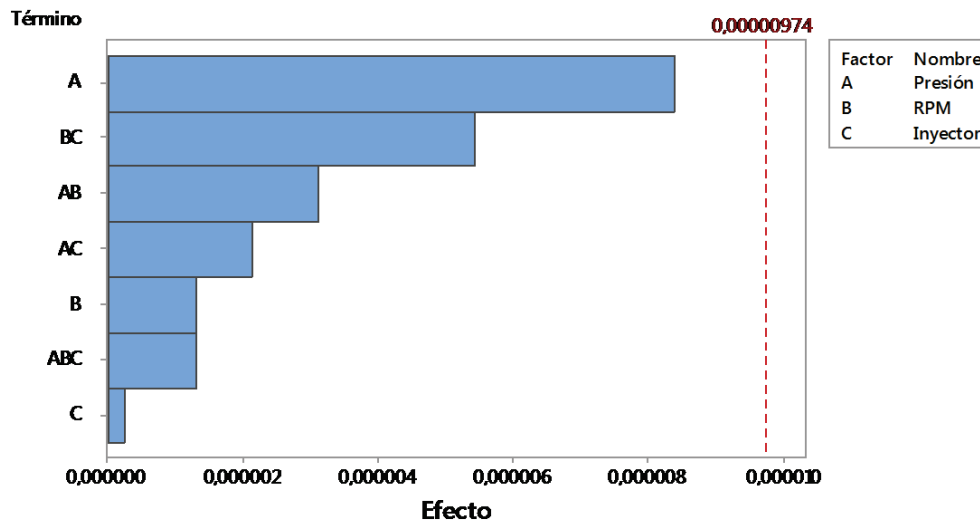


Figura 3.51. Diagrama de Pareto de los efectos para la media. ¹³¹

3.4.3.9 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la varianza

Para la varianza, se puede apreciar en la figura 3.52 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la presión en el riel y la combinación de estos dos factores.

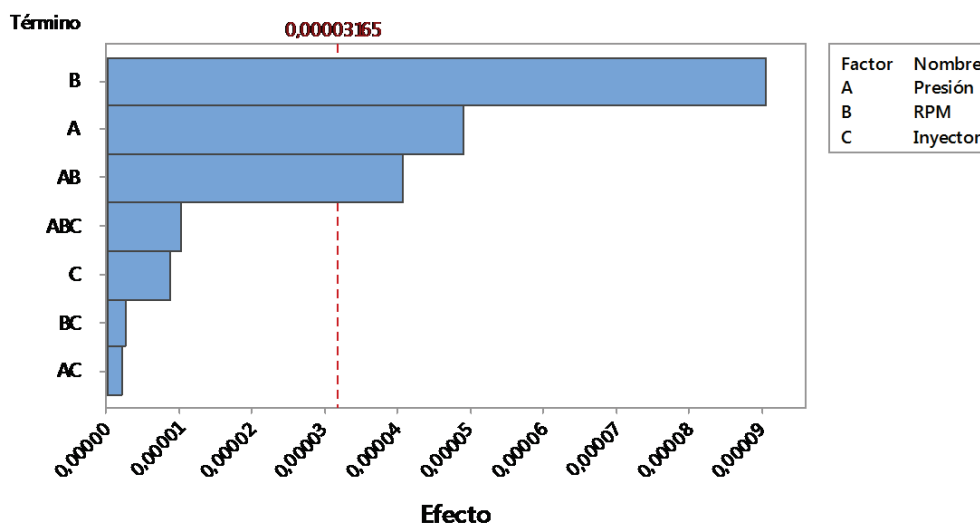


Figura 3.52. Diagrama de Pareto de los efectos para la varianza. ¹³²

¹³¹ Fuente: Los autores.

¹³² Fuente: Los autores.

3.4.3.10 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la desviación estándar

Para la desviación estándar, se puede apreciar en la figura 3.53 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la presión en el riel y la combinación de estos dos factores.

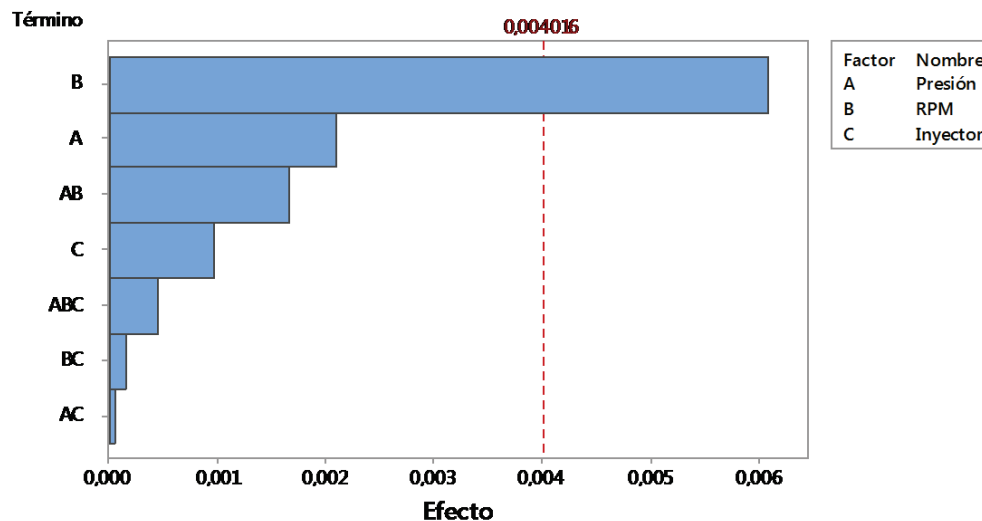


Figura 3.53. Diagrama de Pareto de los efectos para la desviación estándar. ¹³³

3.4.3.11 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor máximo

Para el valor máximo, se puede apreciar en la figura 3.54 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la presión en el riel y la combinación de estos dos factores, mientras que el resto de factores o sus combinaciones no poseen una mayor influencia.

3.4.3.12 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor mínimo

Para el valor mínimo, se puede apreciar en la figura 3.55 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la combinación de los factores presión

¹³³ Fuente: Los autores.

en el riel y régimen de giro, mientras que el resto de factores o sus combinaciones no poseen una mayor influencia.

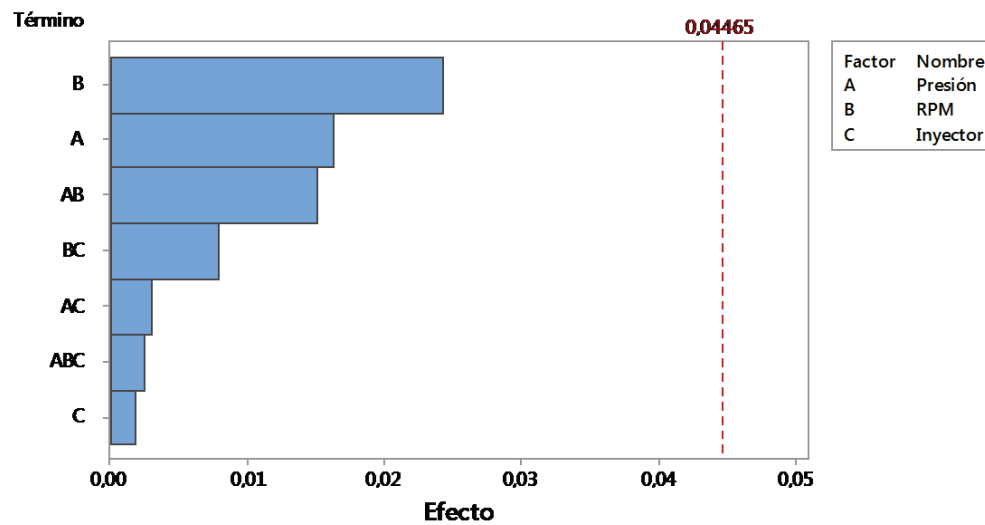


Figura 3.54. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor máximo. ¹³⁴

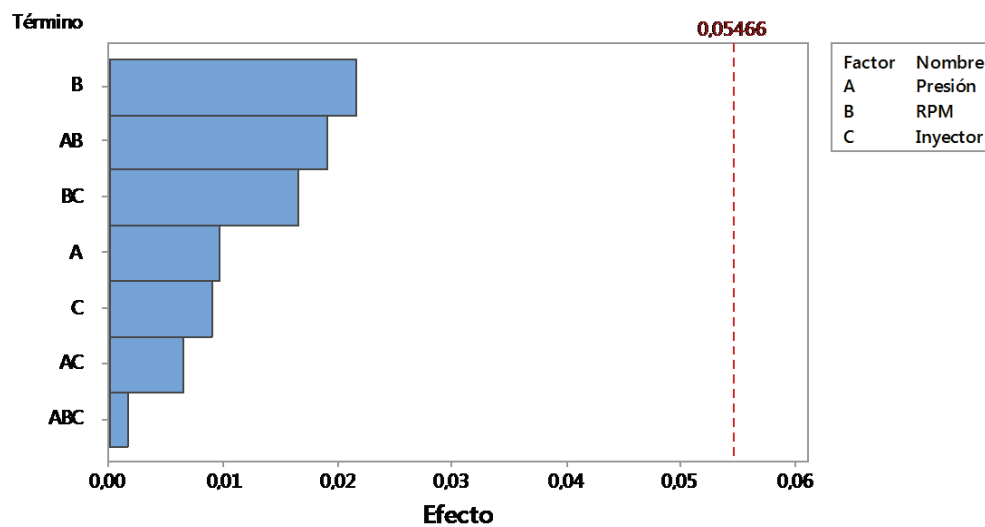


Figura 3.55. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor mínimo. ¹³⁵

¹³⁴ Fuente: Los autores.

¹³⁵ Fuente: Los autores.

3.4.3.13 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la potencia en intervalo de frecuencia

Para la potencia en intervalo de frecuencia, se puede apreciar en la figura 3.56 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la presión en el riel y la combinación de estos dos factores.

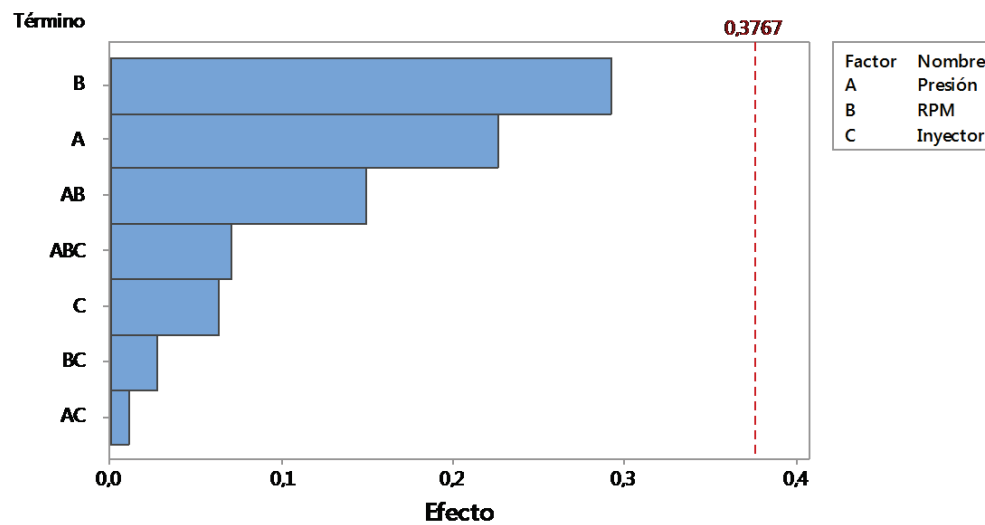


Figura 3.56. Diagrama de Pareto de los efectos para la potencia en intervalo de frecuencia.¹³⁶

3.4.3.14 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para la energía

Para la energía, se puede apreciar en la figura 3.57 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la presión en el riel y la combinación de estos dos factores.

¹³⁶ Fuente: Los autores.

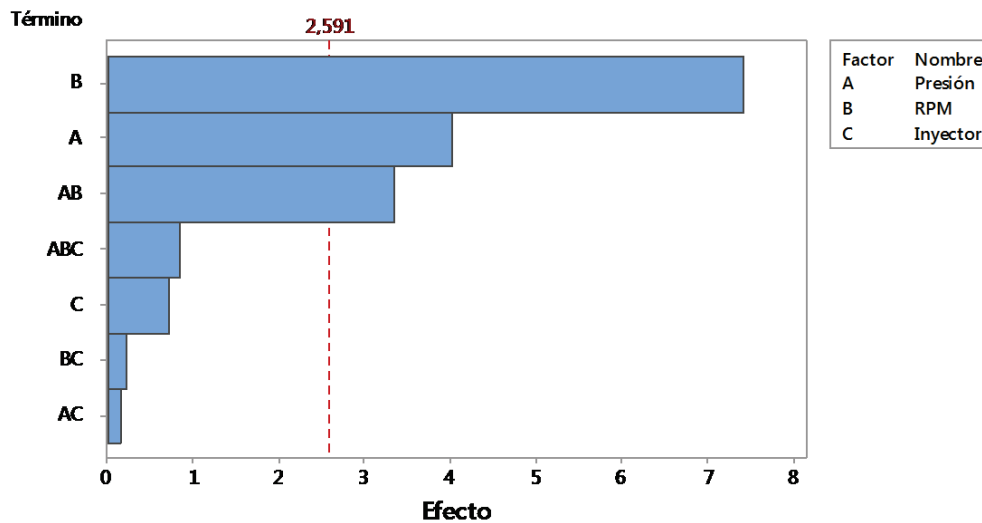


Figura 3.57. Diagrama de Pareto de los efectos para la energía.¹³⁷

3.4.3.15 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico

Para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico, se puede apreciar en la figura 3.58 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido del estado físico del inyector y del factor de presión en el riel que tiene una influencia menor a los dos anteriores.

3.4.3.16 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico

Para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico, se puede apreciar en la figura 3.59 que el factor de mayor influencia es el estado físico del inyector, seguido de la combinación de los factores presión en el riel y estado físico del inyector y de la combinación de los factores presión en el riel y régimen de giro que tiene una influencia menor a los dos anteriores.

¹³⁷ Fuente: Los autores.

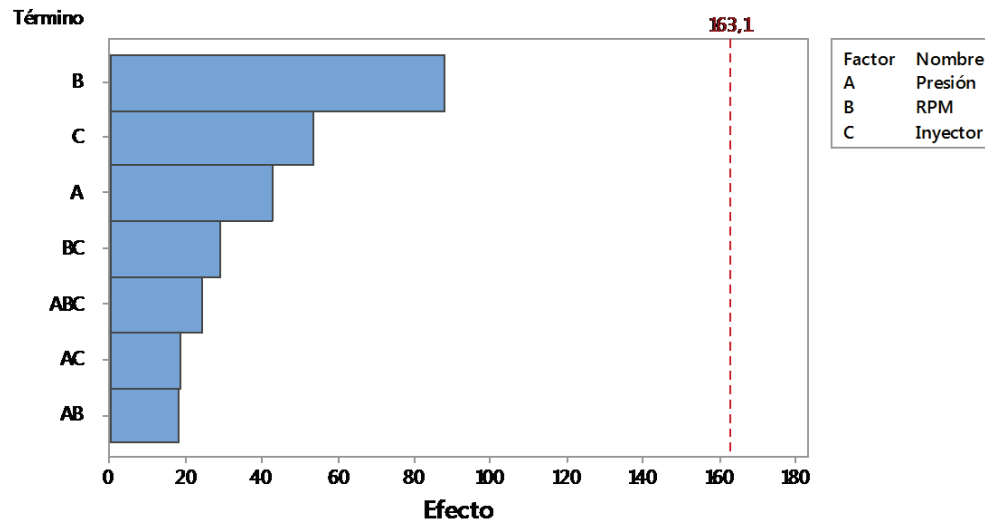


Figura 3.58. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.¹³⁸

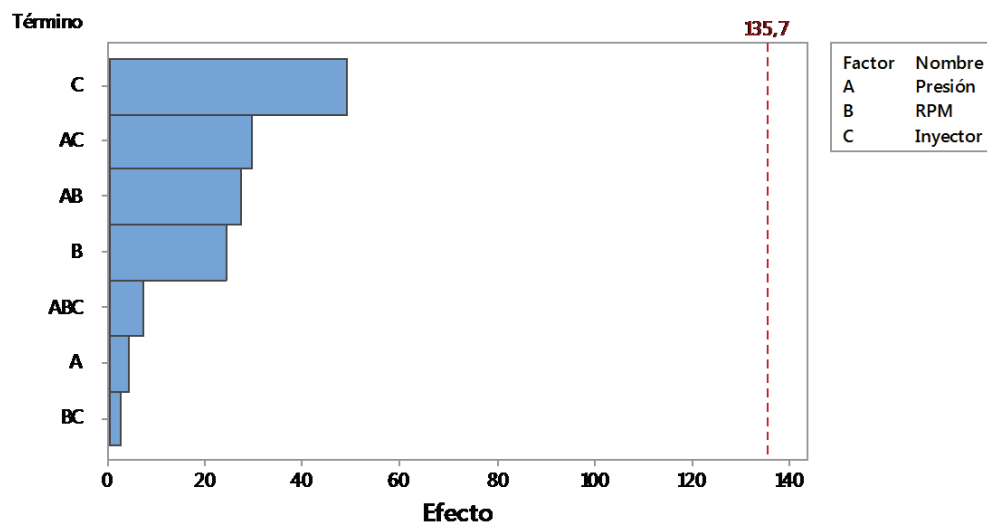


Figura 3.59. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.¹³⁹

¹³⁸ Fuente: Los autores.

¹³⁹ Fuente: Los autores.

3.4.3.17 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico

Para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico, se puede apreciar en la figura 3.60 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la combinación de los factores presión en el riel y estado físico del inyector y del factor presión en el riel que tiene una influencia menor a los dos anteriores.

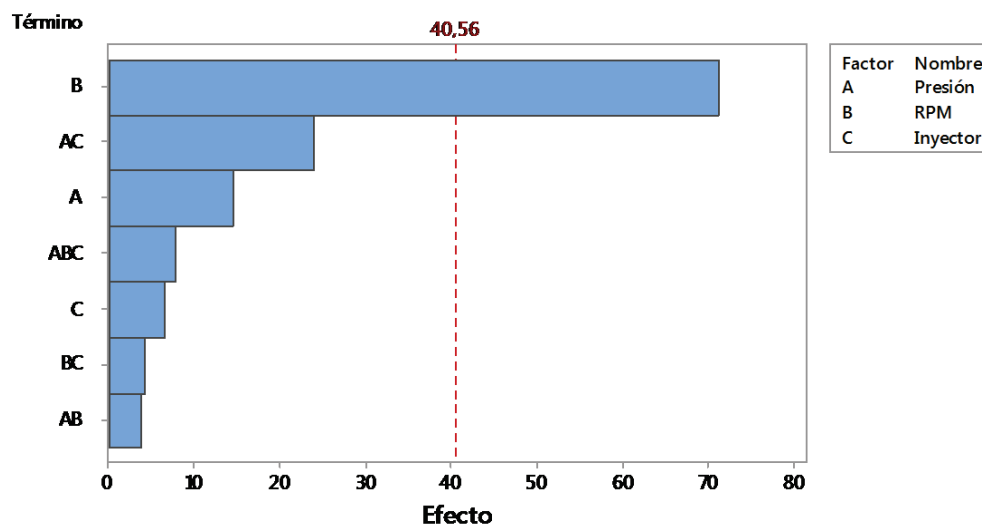


Figura 3.60. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.¹⁴⁰

3.4.3.18 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico

Para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico, se puede apreciar en la figura 3.61 que el factor de mayor influencia es el régimen de giro, seguido de la combinación de los factores presión en el riel y estado físico del inyector y del factor presión en el riel que tiene una influencia menor a los dos anteriores.

¹⁴⁰ Fuente: Los autores.

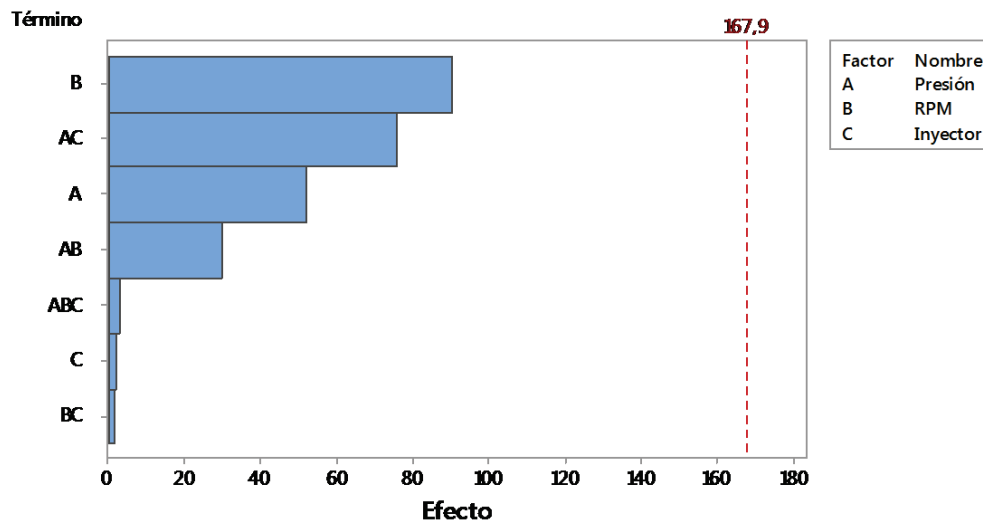


Figura 3.61. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.¹⁴¹

3.4.3.19 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico

Para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico, se puede apreciar en la figura 3.62 que el factor de mayor influencia es el estado físico del inyector, seguido del factor presión en el riel y de la combinación de los factores presión en el riel y régimen de giro que tiene una influencia menor a los dos anteriores.

3.4.3.20 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico

Para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico, se puede apreciar en la figura 3.63 que la combinación de los factores presión en el riel, régimen de giro y estado físico del inyector tienen la influencia más alta, seguido del factor presión en el riel y régimen de giro que tiene una influencia menor a los dos anteriores.

¹⁴¹ Fuente: Los autores.

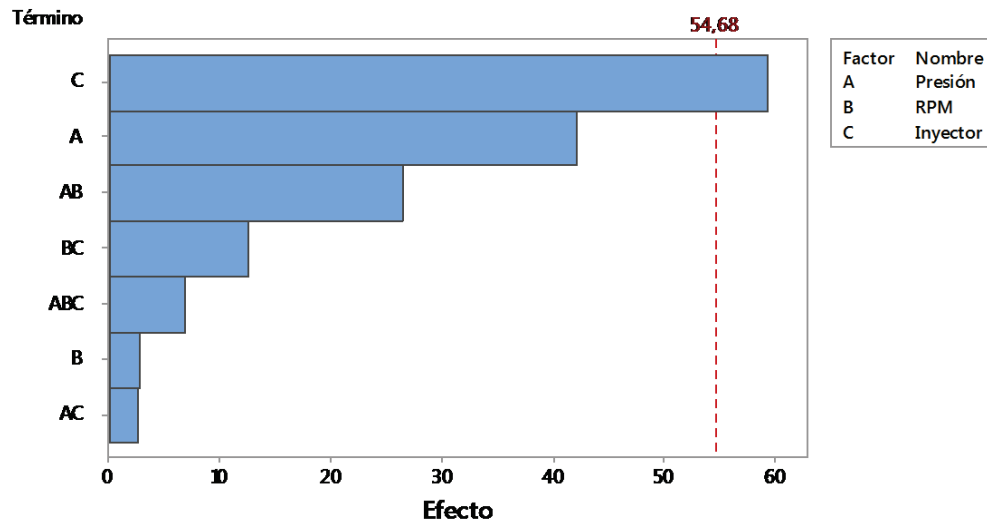


Figura 3.62. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.¹⁴²

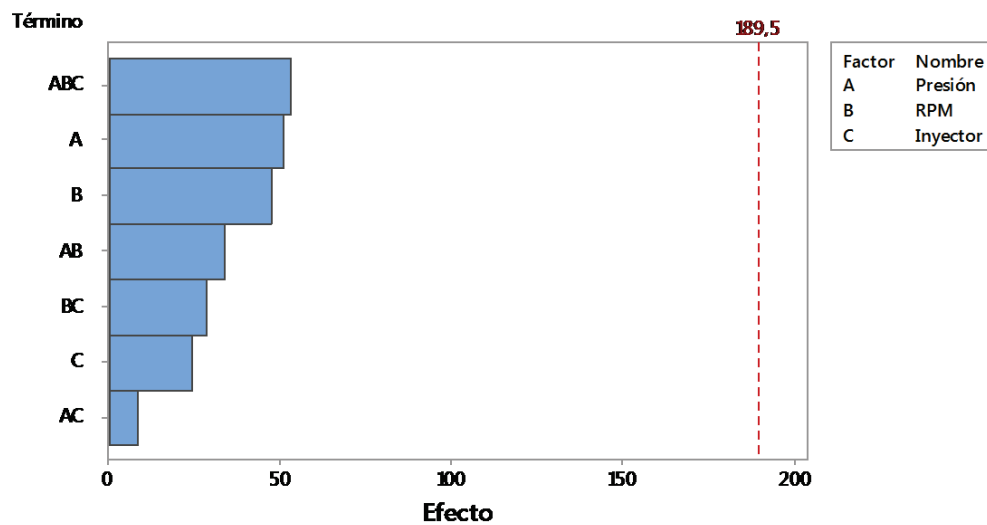


Figura 3.63. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.¹⁴³

¹⁴² Fuente: Los autores.

¹⁴³ Fuente: Los autores.

3.4.3.21 Análisis del diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico

Para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico, se puede apreciar en la figura 3.64 que el factor de mayor influencia es la presión en el riel, seguido de la combinación de los factores presión en el riel y estado físico del inyector y de la combinación del factor régimen de giro y estado físico del inyector que tiene una influencia menor a los dos anteriores.

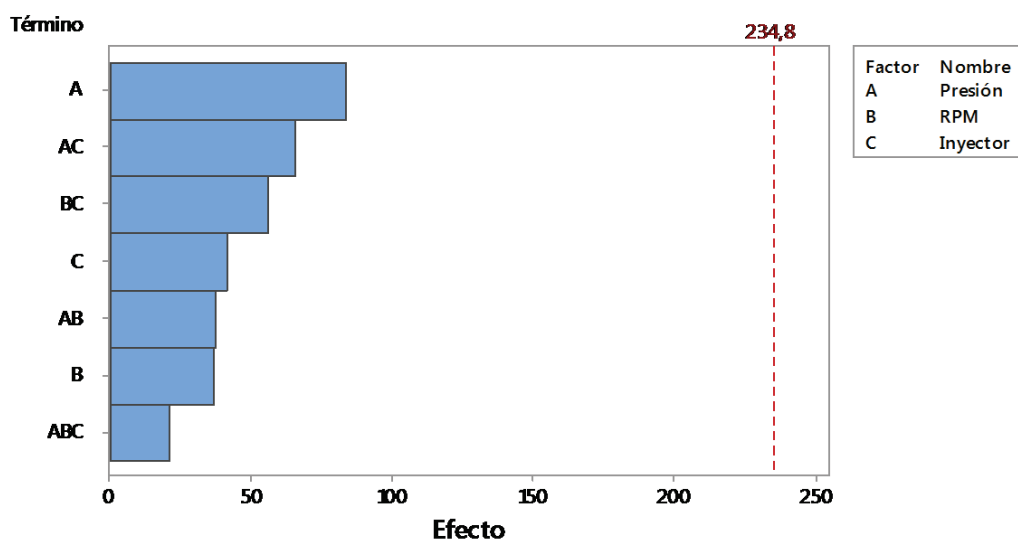


Figura 3.64. Diagrama de Pareto de los efectos para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.¹⁴⁴

3.4.3.22 Nivel de importancia de los efectos de los factores sobre las variables de respuesta

Tomando como base los análisis realizados en los distintos diagramas de Pareto de los efectos para cada variable de respuesta, se establece en la tabla 3.21 el nivel de importancia de los efectos que provocan los factores, presión de inyección en el riel (A), régimen de giro (B) y estado físico del inyector (C), sobre las variables de

¹⁴⁴ Fuente: Los autores.

respuesta obtenidas en las pruebas experimentales, en función de una escala de 1 a 7, considerando a 1 como el de mayor influencia y 7 como el de menor influencia.

Tabla 3.21 Niveles de importancia de los efectos de los factores y sus combinaciones sobre las variables de respuesta.¹⁴⁵

Variables de respuesta	Niveles de importancia						
	1	2	3	4	5	6	7
Potencia	B	A	AB	ABC	C	BC	AC
Asimetría	BC	B	ABC	C	AC	AB	A
Curtosis	B	BC	A	AC	C	ABC	AB
Mediana	BC	C	A	B	AC	AB	ABC
Moda	AB	B	A	AC	C	BC	ABC
Valor RMS	B	A	AB	C	ABC	BC	AC
Factor de Cresta	B	AC	C	A	BC	ABC	AB
Media	A	BC	AB	AC	B	ABC	C
Varianza	B	A	AB	ABC	C	BC	AC
Desviación estándar	B	A	AB	C	ABC	BC	AC
Valor máximo	B	A	AB	BC	AC	ABC	C
Valor mínimo	B	AB	BC	A	C	AC	ABC
Potencia en intervalo de frecuencia	B	A	AB	ABC	C	BC	AC
Energía	B	A	AB	ABC	C	BC	AC
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	B	C	A	BC	ABC	AC	AB
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	C	AC	AB	B	ABC	A	BC
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	B	AC	A	ABC	C	BC	AB
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	B	AC	A	AB	ABC	C	BC
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	C	A	AB	BC	ABC	B	AC
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	ABC	A	B	AB	BC	C	AC
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	A	AC	BC	C	AB	B	ABC

Se puede apreciar en la tabla 3.21 que el factor de mayor influencia sobre las variables de respuesta de las pruebas experimentales, es el régimen de giro del

¹⁴⁵ Fuente: Los autores.

motor, siguiéndole en importancia la presión de inyección en el riel, y la combinación de estas dos. El estado físico del inyector no presenta una influencia significativa en las variables.

3.4.4 ANÁLISIS DE DIAGRAMAS DE EFECTOS PRINCIPALES, DE INTERACCIÓN DE FACTORES, GRÁFICAS DE SUPERFICIE Y CONTORNO

En este punto se establece el comportamiento de cada una de las variables de respuesta obtenidas en las pruebas experimentales, con respecto a los factores de presión de inyección en el riel, régimen de giro y estado físico del inyector, se efectúa también el análisis de las distintas interacciones de los factores en cada variable de respuesta complementando el análisis con graficas de superficie y contorno, para esto se obtienen las gráficas respectivas utilizando el programa Minitab®.

3.4.4.1 Análisis de diagramas de potencia

En la figura 3.65 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la potencia respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en la potencia, seguido de la presión de inyección en el riel y del estado físico del inyector.

En la figura 3.66 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción débil entre la presión de inyección en el riel y el régimen de giro debido a que las líneas en esta gráfica no son paralelas, el resto de interacciones no son significativas pues no existen cruces definidos en las gráficas.

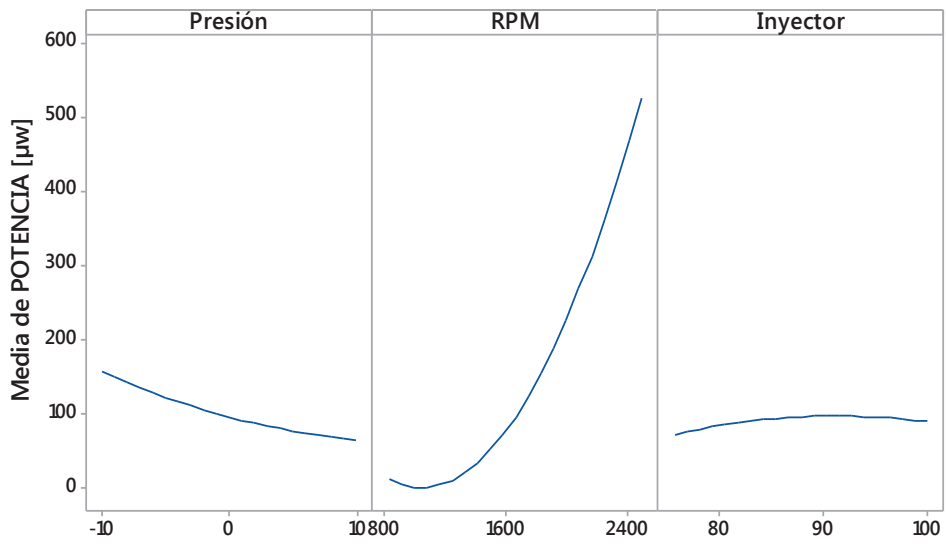


Figura 3.65. Gráfica de efectos principales para potencia.¹⁴⁶

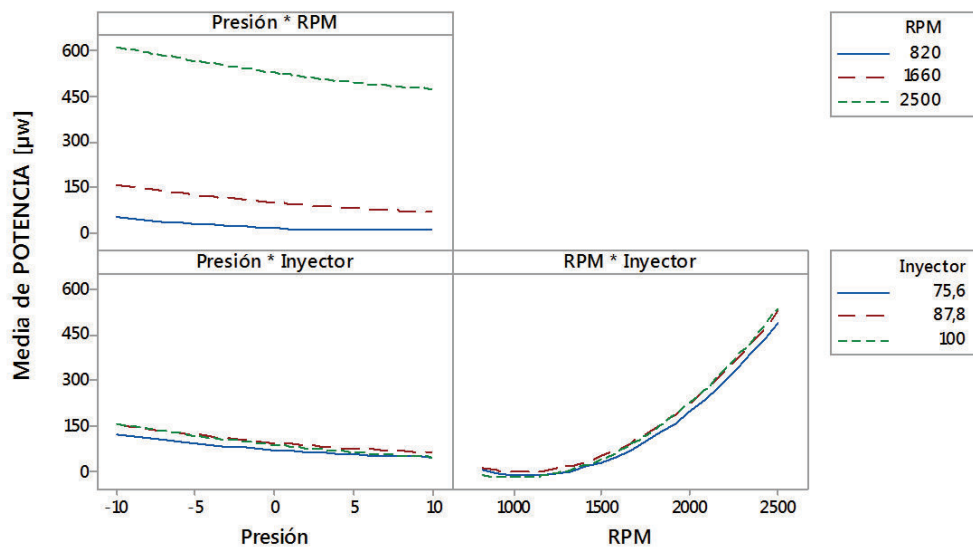


Figura 3.66. Gráfica de interacción para potencia.¹⁴⁷

¹⁴⁶ Fuente: Los autores.

¹⁴⁷ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.1), que establece el comportamiento de la potencia en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 95,70 \%$.

$$\begin{aligned} \text{POTENCIA } [\mu\text{w}] = & -341 + 6,6 \text{ Presión} - 0,651 \text{ RPM} + 15,8 \text{ Inyector} + 0,146 \text{ Presión}^2 \\ & + 0,000246 \text{ RPM}^2 \quad - 0,101 \text{ Inyector}^2 \quad - 0,00298 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \\ & - 0,070 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} \quad + 0,00162 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.1)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.67, que representa el comportamiento de la potencia versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación de potencia, además en la figura 3.68 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

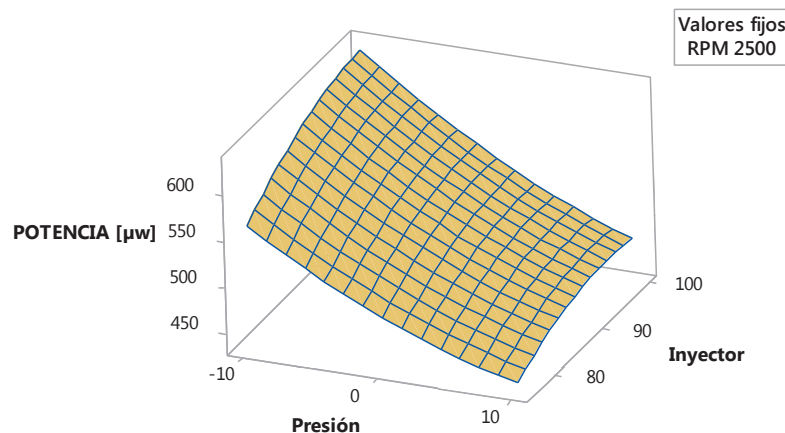


Figura 3.67. Gráfica de superficie de Potencia $[\mu\text{w}]$ vs. Inyector. Presión.¹⁴⁸

¹⁴⁸ Fuente: Los autores.

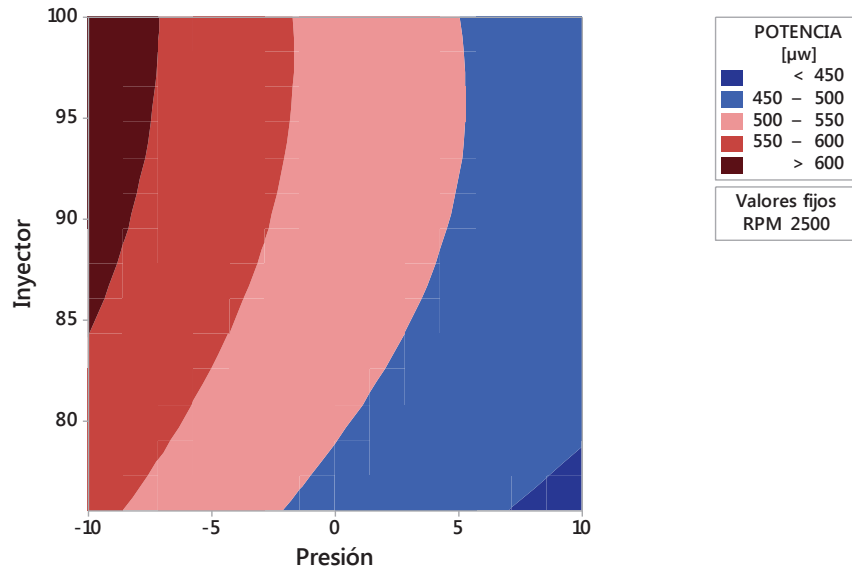
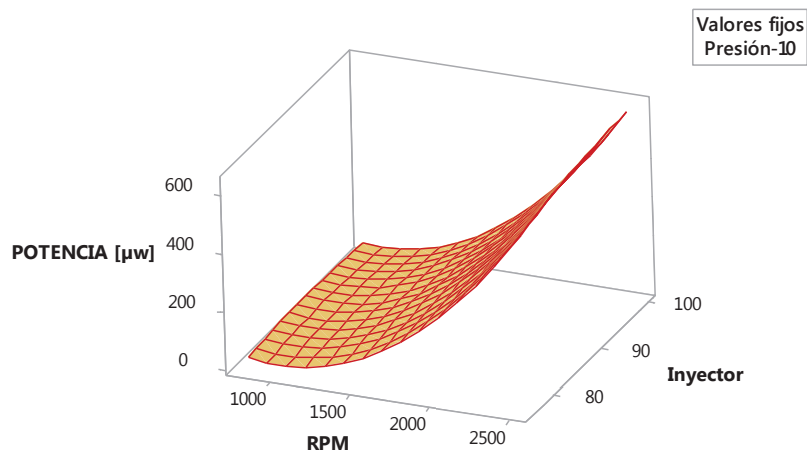


Figura 3.68. Gráfica de contorno de Potencia [μw] vs. Inyector. Presión.¹⁴⁹

En la figura 3.69 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la potencia versus estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel con -10 bar, que es donde se da la mayor variación de potencia, además en la figura 3.70 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.



¹⁴⁹ Fuente: Los autores.

Figura 3.69. Gráfica de superficie de Potencia [μw] vs. Inyector. RPM.¹⁵⁰

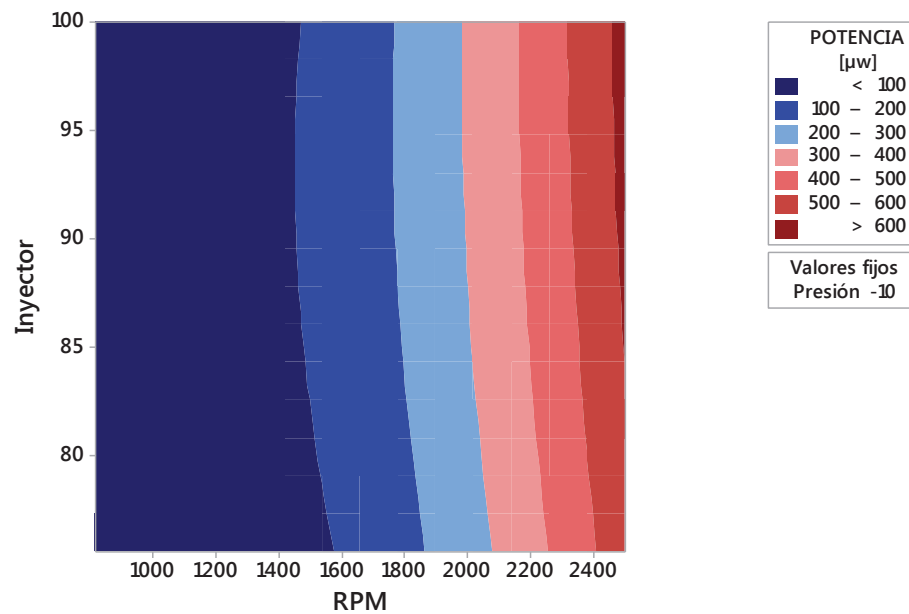


Figura 3.70. Gráfica de contorno de Potencia [μw] vs. Inyector. RPM.¹⁵¹

3.4.4.2 Análisis de diagramas de asimetría

En la figura 3.71 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la asimetría respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en la asimetría, seguido del estado físico del inyector y de la presión de inyección en el riel.

En la figura 3.72 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el régimen de giro así como también entre el régimen de giro y el estado físico del inyector, ya que existen cruces definidos en las gráficas.

¹⁵⁰ Fuente: Los autores.

¹⁵¹ Fuente: Los autores.

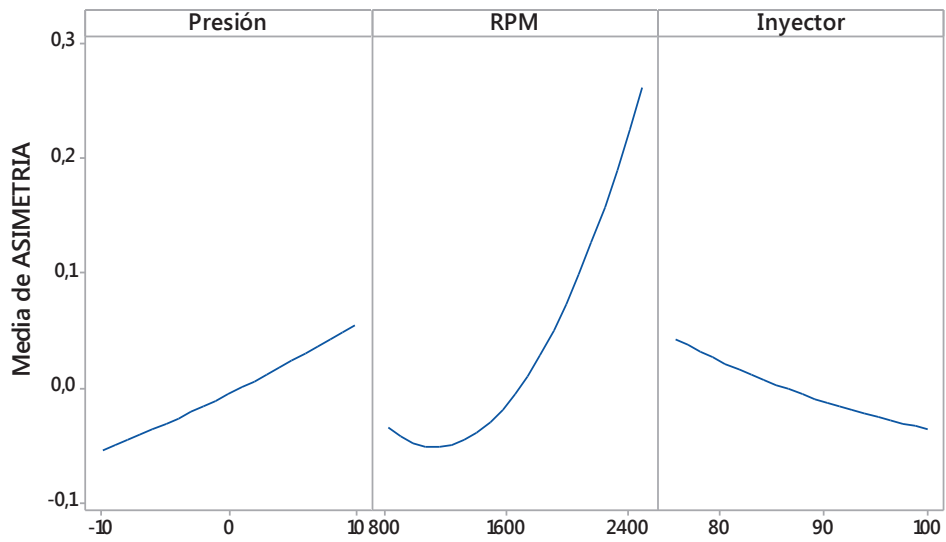


Figura 3.71. Gráfica de efectos principales para la asimetría.¹⁵²

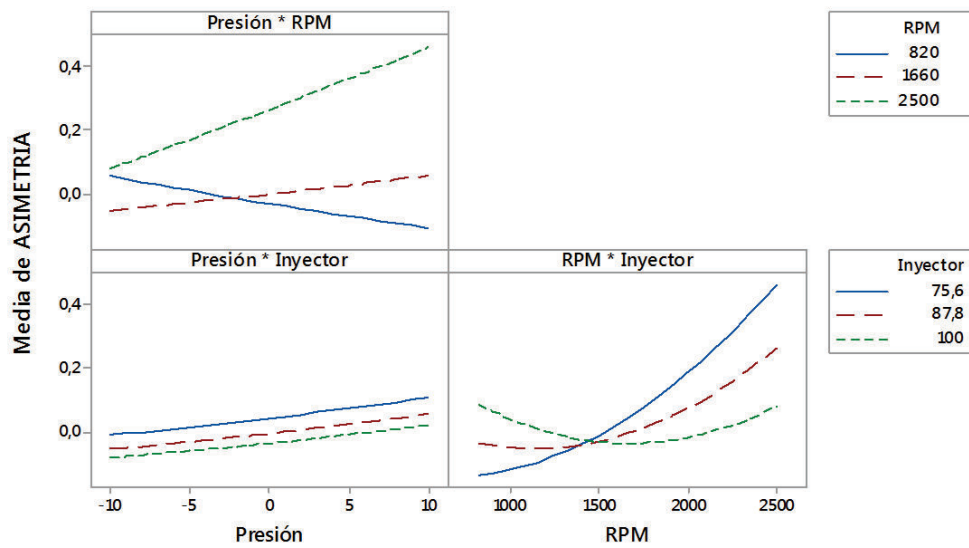


Figura 3.72. Gráfica de interacción para la asimetría.¹⁵³

¹⁵² Fuente: Los autores.

¹⁵³ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.2) que establece el comportamiento de la asimetría en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 82,3 \%$.

$$\begin{aligned} \text{ASIMETRIA} = & -1,23 - 0,0187 \text{ Presión} + 0,000913 \text{ RPM} + 0,0106 \text{ Inyector} \\ & + 0,000056 \text{ Presión}^2 + 0,000000 \text{ RPM}^2 + 0,000061 \text{ Inyector} * \text{Inyector} \\ & + 0,000016 \text{ Presión} * \text{RPM} - 0,000031 \text{ Presión} * \text{Inyector} - 0,000015 \text{ RPM} * \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.2)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.73, que representa el comportamiento de la asimetría versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación de la asimetría, además en la figura 3.74 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

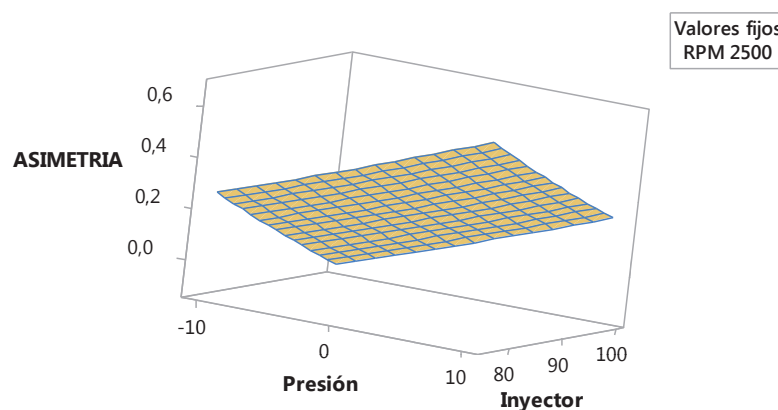


Figura 3.73. Gráfica de superficie de Asimetría vs. Inyector. Presión.¹⁵⁴

¹⁵⁴ Fuente: Los autores.

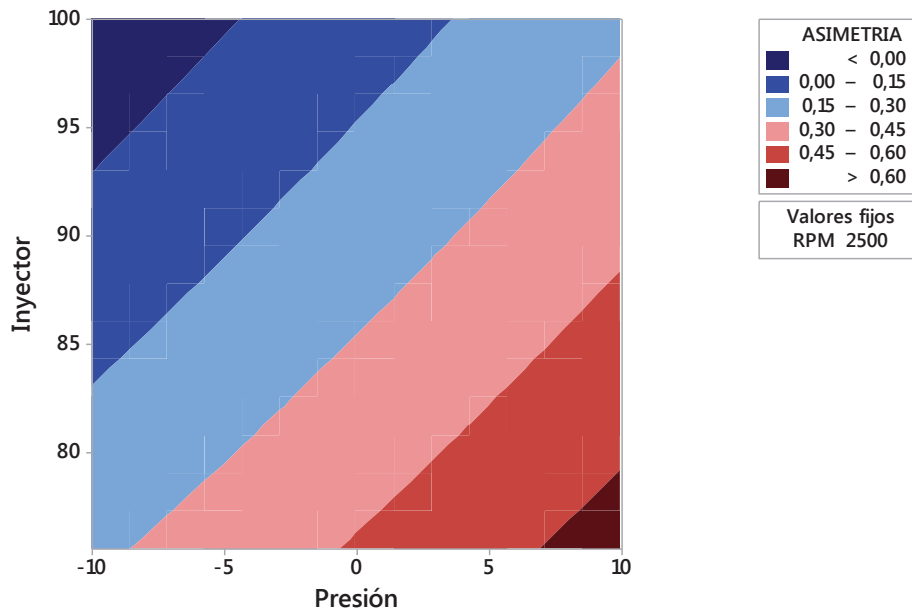


Figura 3.74. Gráfica de contorno de Asimetría vs. Inyector. Presión.¹⁵⁵

En la figura 3.75 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la asimetría versus presión de inyección en el riel y régimen de giro, tomando como valor fijo el estado físico del inyector a 75,6 %, que es donde se da la mayor variación de la asimetría, además en la figura 3.76 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

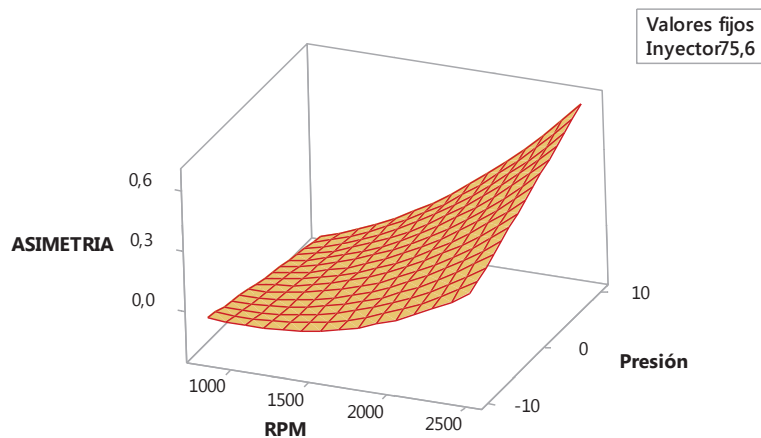


Figura 3.75. Gráfica de superficie de Asimetría vs. Presión. RPM.¹⁵⁶

¹⁵⁵ Fuente: Los autores.

¹⁵⁶ Fuente: Los autores.

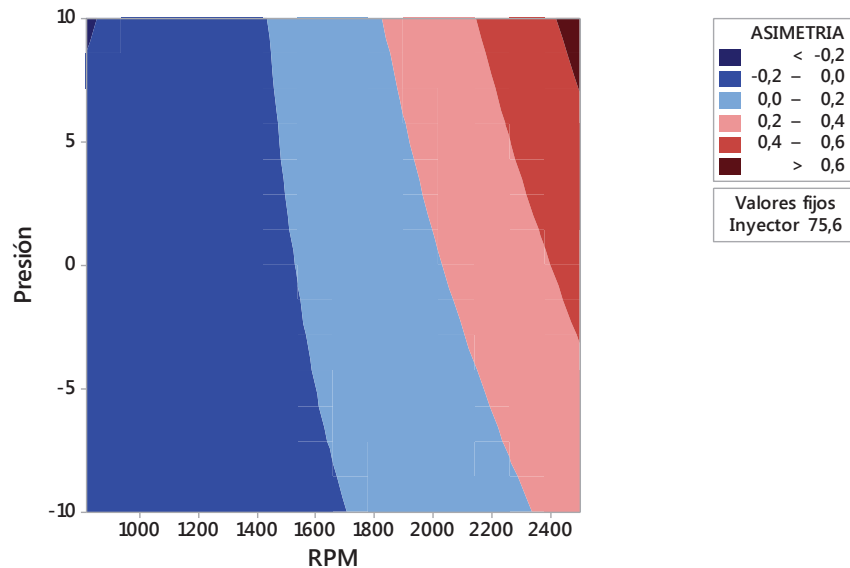


Figura 3.76. Gráfica de contorno de Asimetría vs. Presión. RPM.¹⁵⁷

3.4.4.3 Análisis de diagramas de curtosis

En la figura 3.77 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la curtosis respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en curtosis, seguido del estado físico del inyector, el factor de la presión de inyección en el riel posee poca influencia pues la curva tiende a una recta horizontal.

En la figura 3.78 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la el régimen de giro y el estado físico del inyector así como también entre presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector, ya que existen cruces definidos en las gráficas.

¹⁵⁷ Fuente: Los autores.

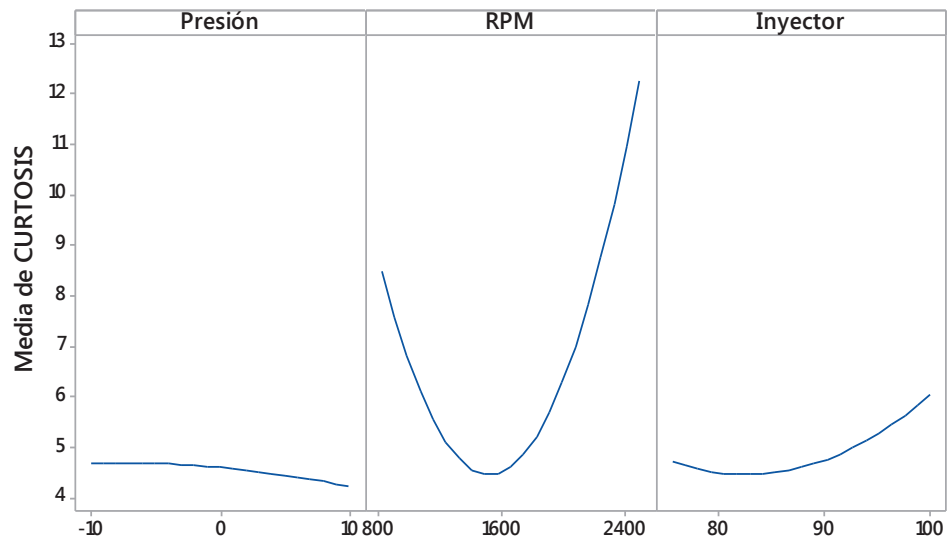


Figura 3.77. Gráfica de efectos principales para curtosis.¹⁵⁸

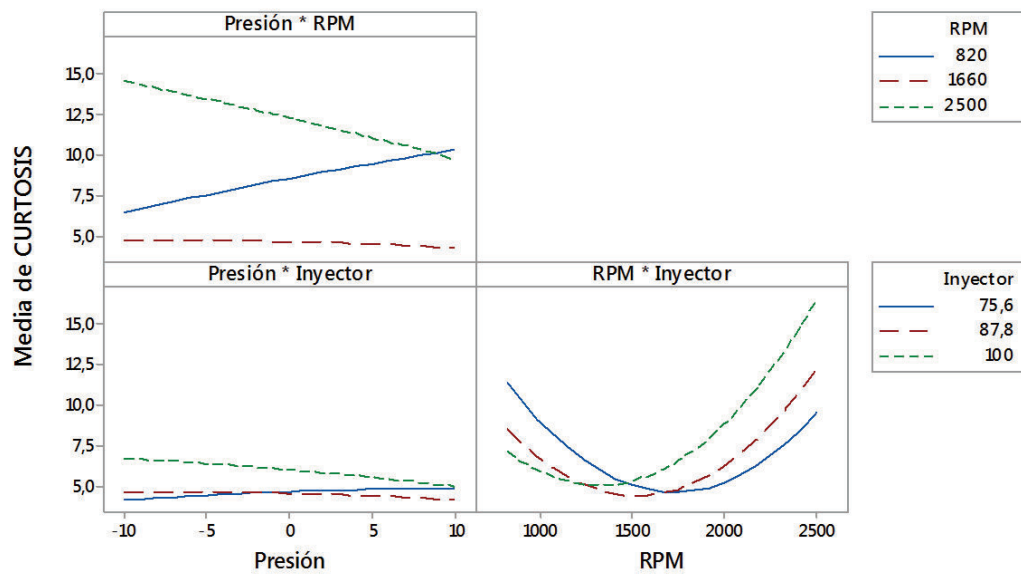


Figura 3.78. Gráfica de interacción para curtosis.¹⁵⁹

¹⁵⁸ Fuente: Los autores.

¹⁵⁹ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.3) que establece el comportamiento de curtosis en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 81,93 \%$.

$$\begin{aligned} \text{CURTOSIS} = & 98,7 + 0,852 \text{ Presión} - 0,04891 \text{ RPM} - 1,316 \text{ Inyector} \\ & - 0,00152 \text{ Presión}^2 + 0,000008 \text{ RPM}^2 + 0,00522 \text{ Inyector}^2 - 0,000258 \text{ Presión} * \text{RPM} \\ & - 0,00509 \text{ Presión} * \text{Inyector} + 0,000273 \text{ RPM} * \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.3)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.79, que representa el comportamiento de la curtosis versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación de curtosis, además en la figura 3.80 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

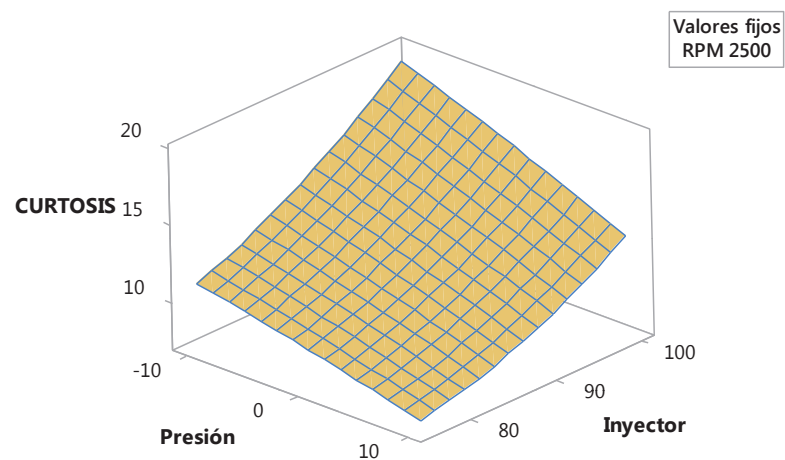


Figura 3.79. Gráfica de superficie de Curtosis vs. Inyector. Presión.¹⁶⁰

¹⁶⁰ Fuente: Los autores.

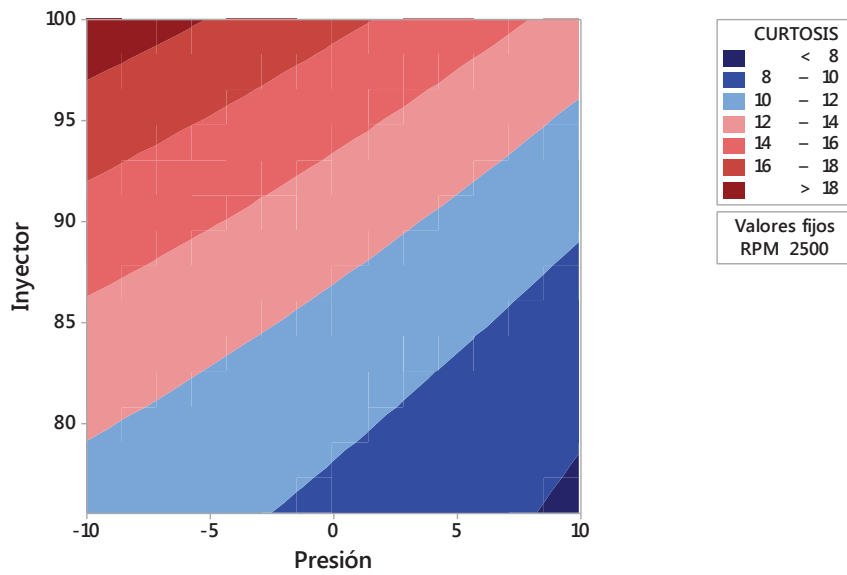


Figura 3.80. Gráfica de contorno de Curtosis vs. Inyector. Presión.¹⁶¹

En la figura 3.81 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de curtosis versus presión de inyección en el riel y régimen de giro, tomando como valor fijo el estado físico del inyector a 100 %, que es donde se da la mayor variación de curtosis, además en la figura 3.82 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

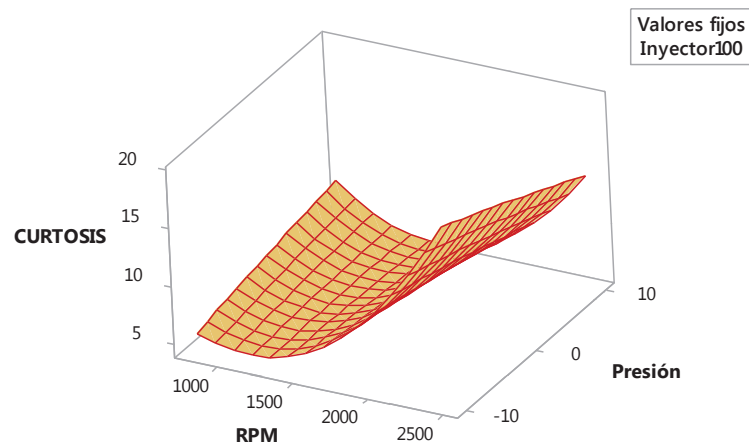


Figura 3.81. Gráfica de superficie de Curtosis vs. Presión. RPM.¹⁶²

¹⁶¹ Fuente: Los autores.

¹⁶² Fuente: Los autores.

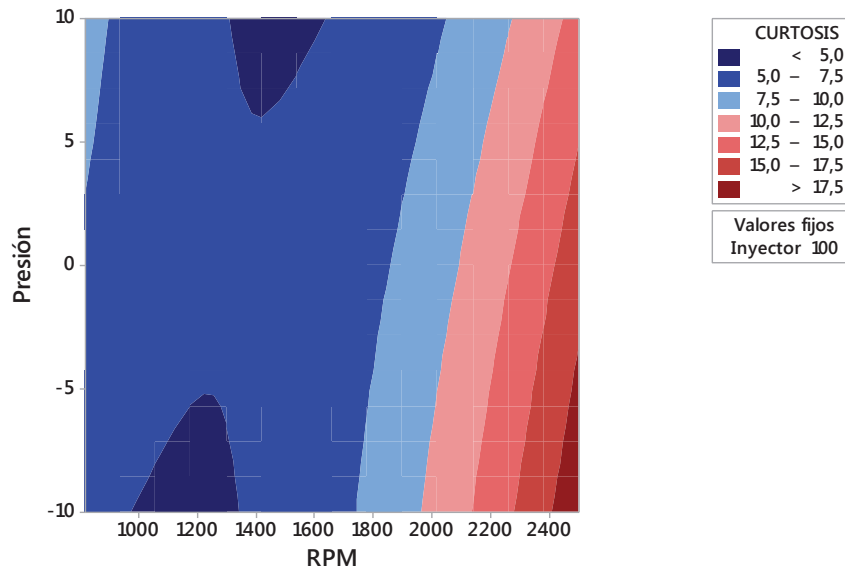


Figura 3.82. Gráfica de contorno de Curtosis vs. Presión. RPM.¹⁶³

3.4.4.4 Análisis de diagramas de la mediana

En la figura 3.83 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la mediana respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro y estado físico del inyector son los factores que más influyen en la mediana, de estos dos factores el estado físico del inyector posee una influencia mayor, la presión de inyección en el riel tiene menor influencia al compararla con las curvas de los otros dos factores.

En la figura 3.84 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la el régimen de giro y el estado físico del inyector así como también entre presión de inyección en el riel y régimen de giro, ya que existen cruces definidos en las gráficas.

¹⁶³ Fuente: Los autores.

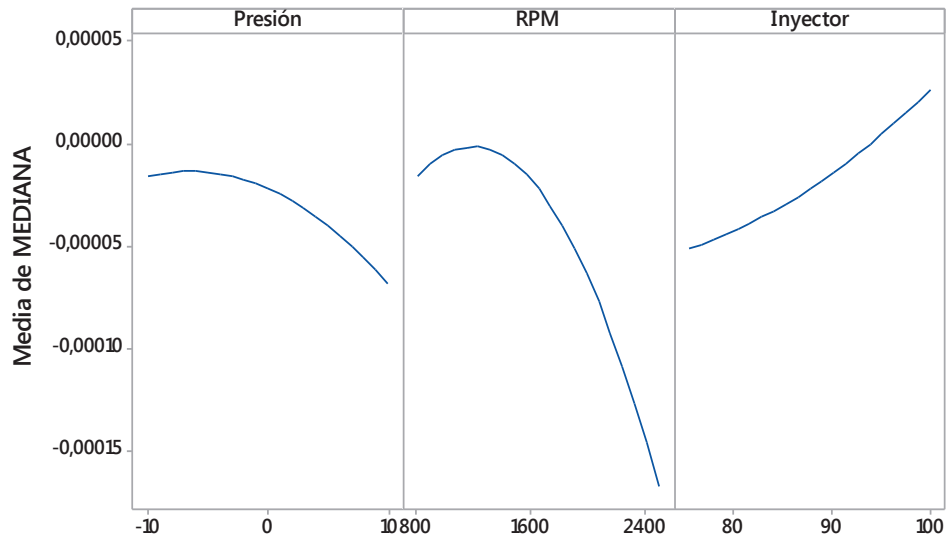


Figura 3.83. Gráfica de efectos principales para la mediana.¹⁶⁴

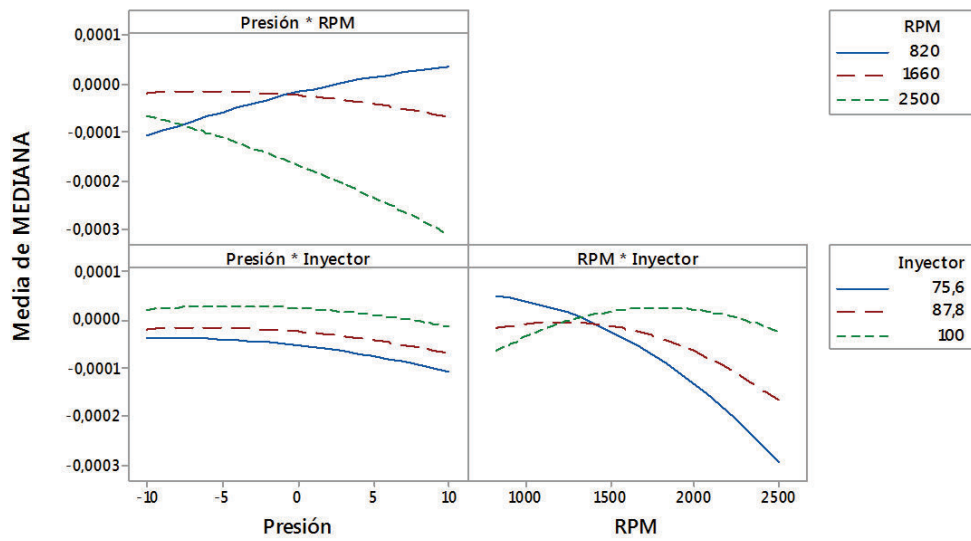


Figura 3.84. Gráfica de interacción para la mediana.¹⁶⁵

¹⁶⁴ Fuente: Los autores.

¹⁶⁵ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.4) que establece el comportamiento de la mediana en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 70,14 \%$.

$$\begin{aligned} \text{MEDIANA} = & 0,00144 + 0,000010 \text{ Presión} - 0,000001 \text{ RPM} - 0,000024 \text{ Inyector} \\ & - 0,0000001 \text{ Presión}^2 - 0,0000001 \text{ RPM}^2 + 0,0000001 \text{ Inyector}^2 \\ & - 0,0000001 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} + 0,0000001 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} \\ & + 0,0000001 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.4)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.85, que representa el comportamiento de la mediana versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 1400 rpm que es donde se da la mayor variación de potencia, además en la figura 3.86 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

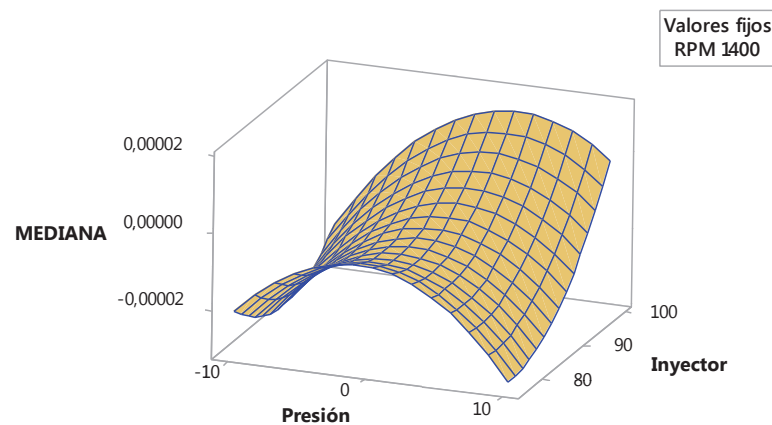


Figura 3.85. Gráfica de superficie de la Mediana vs. Inyector. Presión.¹⁶⁶

¹⁶⁶ Fuente: Los autores.

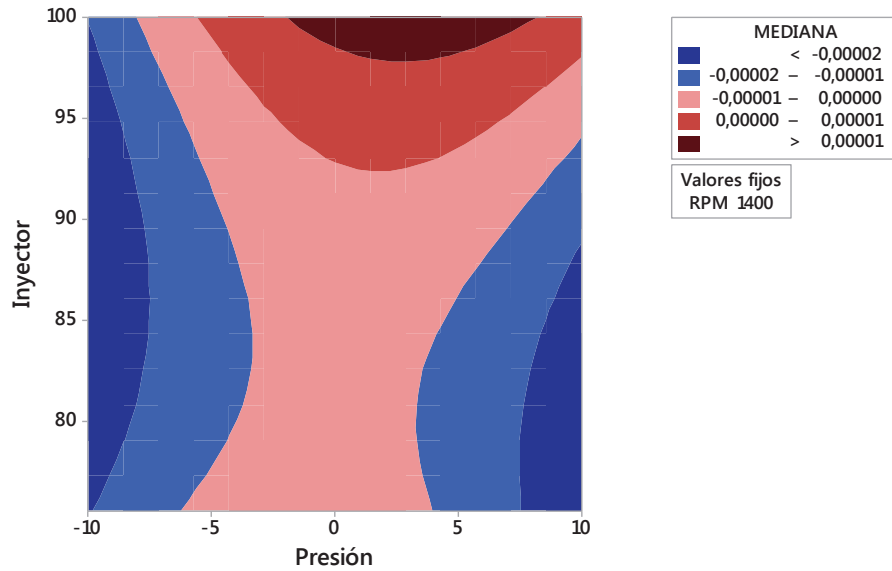


Figura 3.86. Gráfica de contorno de la Mediana vs. Inyector. Presión.¹⁶⁷

En la figura 3.87 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la mediana versus presión de inyección en el riel y régimen de giro, tomando como valor fijo el estado físico del inyector a 100 %, que es donde se da la mayor variación de la mediana, además en la figura 3.88 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

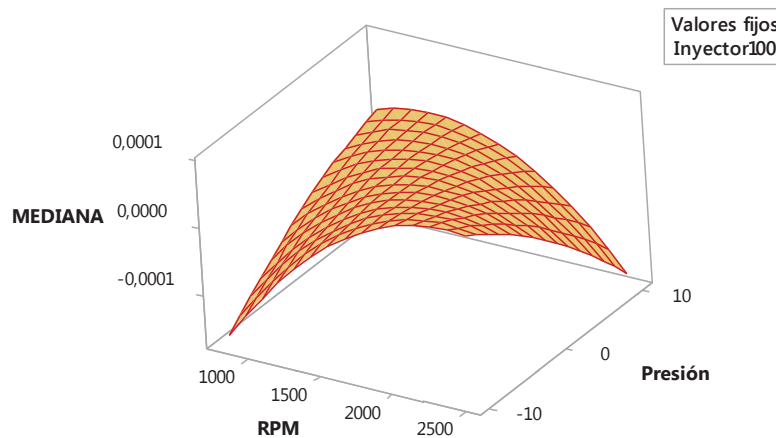


Figura 3.87. Gráfica de superficie de la Mediana vs. Presión. RPM.¹⁶⁸

¹⁶⁷ Fuente: Los autores.

¹⁶⁸ Fuente: Los autores.

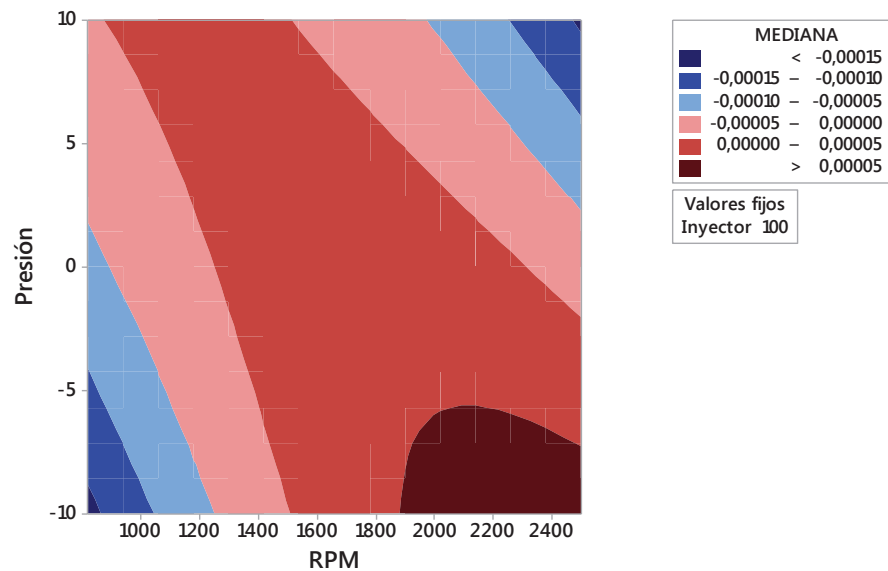


Figura 3.88. Gráfica de contorno de la Mediana vs. Presión. RPM.¹⁶⁹

3.4.4.5 Análisis de diagramas de la moda

En la figura 3.89 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la moda respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro y presión de inyección en el riel son los factores que más influyen en la moda, de estos dos factores el régimen de giro posee una influencia mayor, el estado físico del inyector tiene menor influencia al compararla con las curvas de los otros dos factores.

En la figura 3.90 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector así como también entre el estado físico del inyector y régimen de giro, ya que existen cruces definidos en las gráficas.

¹⁶⁹ Fuente: Los autores.

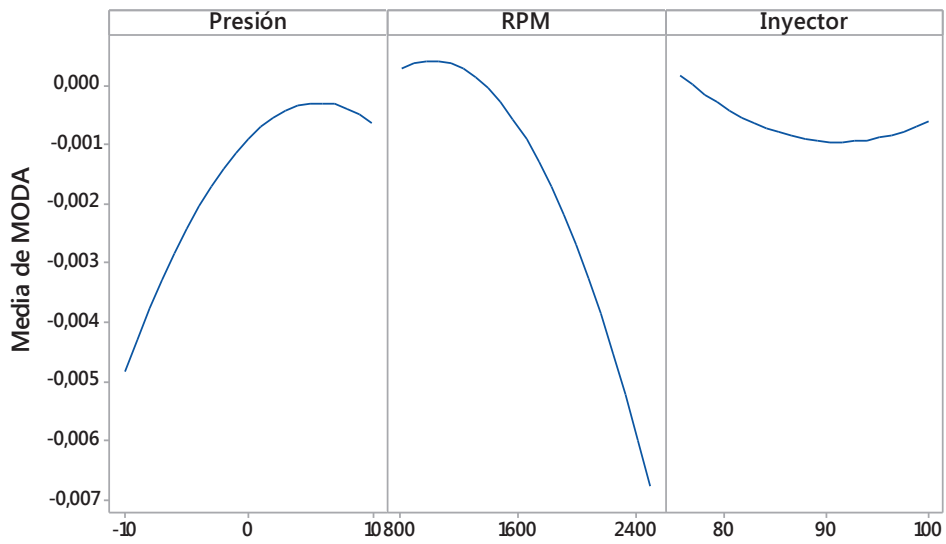


Figura 3.89. Gráfica de efectos principales para la moda.¹⁷⁰

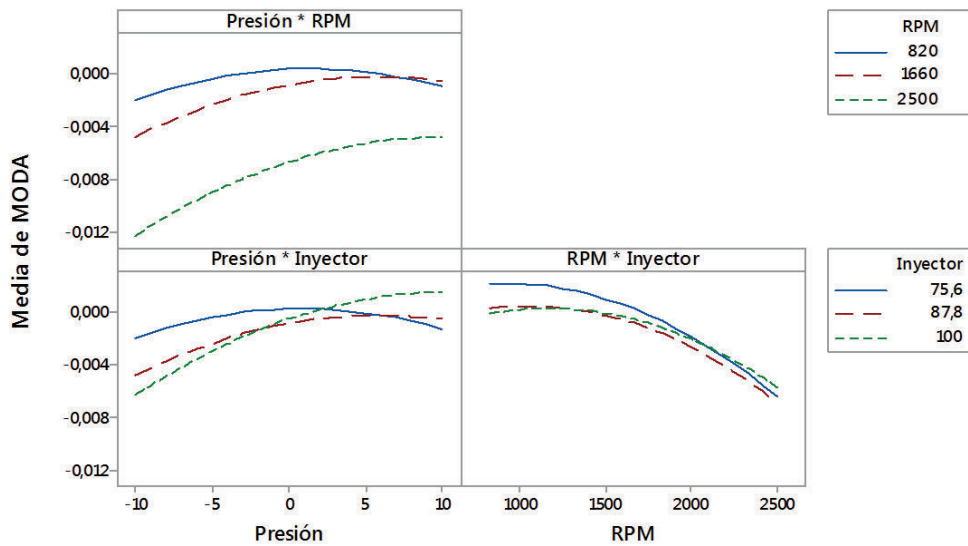


Figura 3.90. Gráfica de interacción para la moda.¹⁷¹

¹⁷⁰ Fuente: Los autores.

¹⁷¹ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.5) que establece el comportamiento de la moda en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 70,1 \%$.

$$\text{MODA} = 0,046 - 0,00139 \text{ Presión} + 0,000001 \text{ RPM} - 0,00097 \text{ Inyector} - 0,000018 \text{ Presión}^2 + 0,000005 \text{ Inyector}^2 + 0,000015 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} \quad (3.5)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.91, que representa el comportamiento de la moda versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 820 rpm que es donde se da la mayor variación de la moda, además en la figura 3.92 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

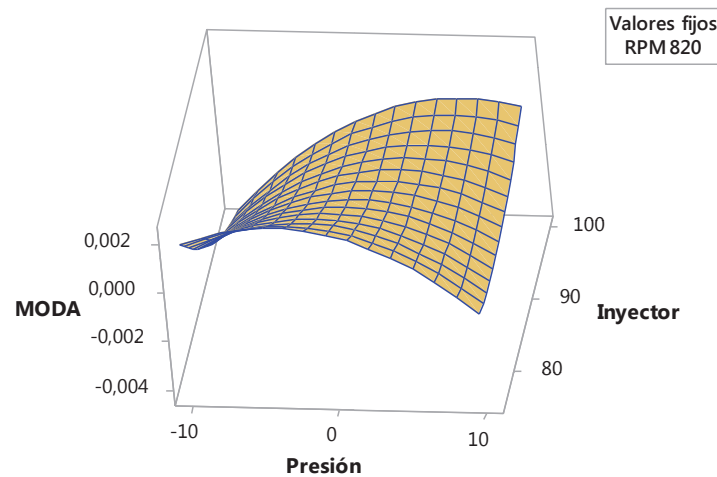


Figura 3.91. Gráfica de superficie de la Moda vs. Inyector. Presión.¹⁷²

¹⁷² Fuente: Los autores.

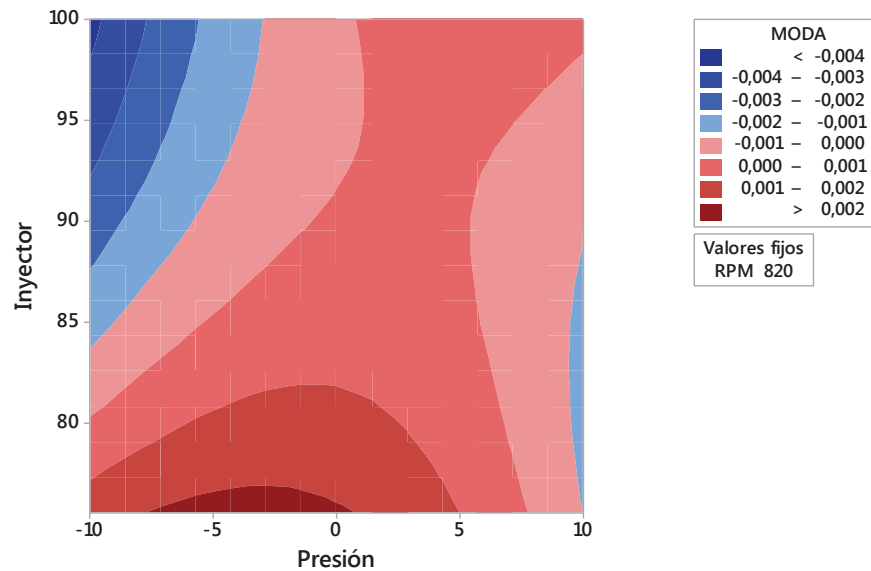


Figura 3.92. Gráfica de contorno de la Moda vs. Inyector. Presión.¹⁷³

En la figura 3.93 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la moda versus estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel a 10 bar, que es donde se da la mayor variación de la moda, además en la figura 3.94 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

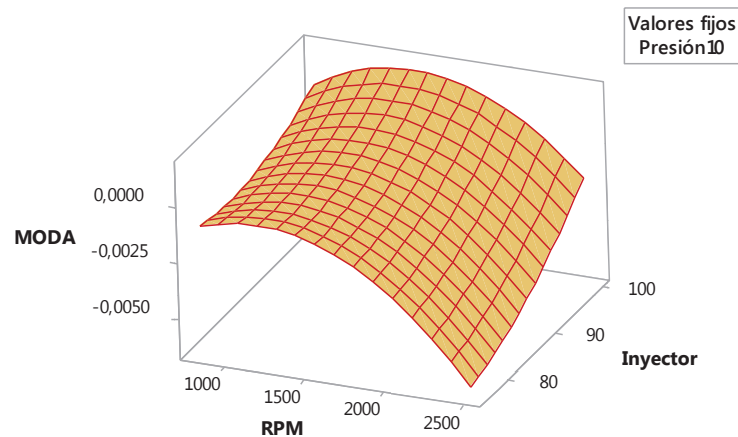


Figura 3.93. Gráfica de superficie de la Moda vs. Inyector. RPM.¹⁷⁴

¹⁷³ Fuente: Los autores.

¹⁷⁴ Fuente: Los autores.

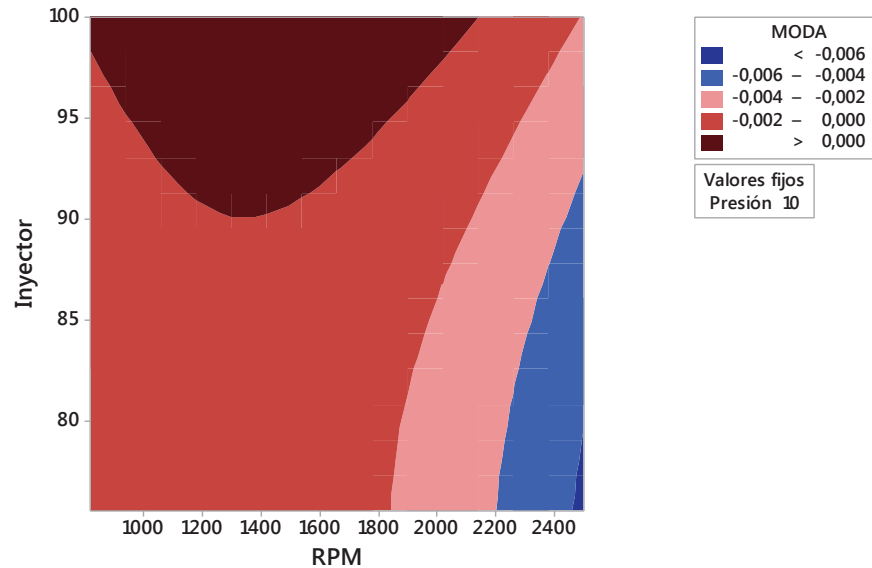


Figura 3.94. Gráfica de contorno de la Moda vs. Inyector. RPM.¹⁷⁵

3.4.4.6 Análisis de diagramas del valor RMS

En la figura 3.95 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor RMS respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en el valor RMS, seguido del factor presión de inyección en el riel, mientras que el factor estado físico del inyector posee poca influencia pues la curva tiende a una recta horizontal.

En la figura 3.96 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector así como también entre el estado físico del inyector y régimen de giro, ya que existen cruces definidos en las gráficas.

¹⁷⁵ Fuente: Los autores.

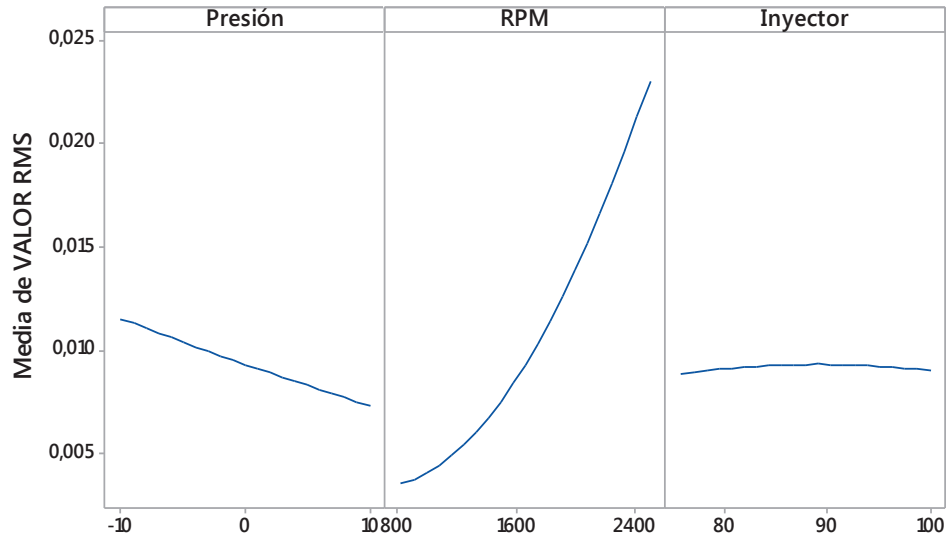


Figura 3.95. Gráfica de efectos principales para el valor RMS.¹⁷⁶

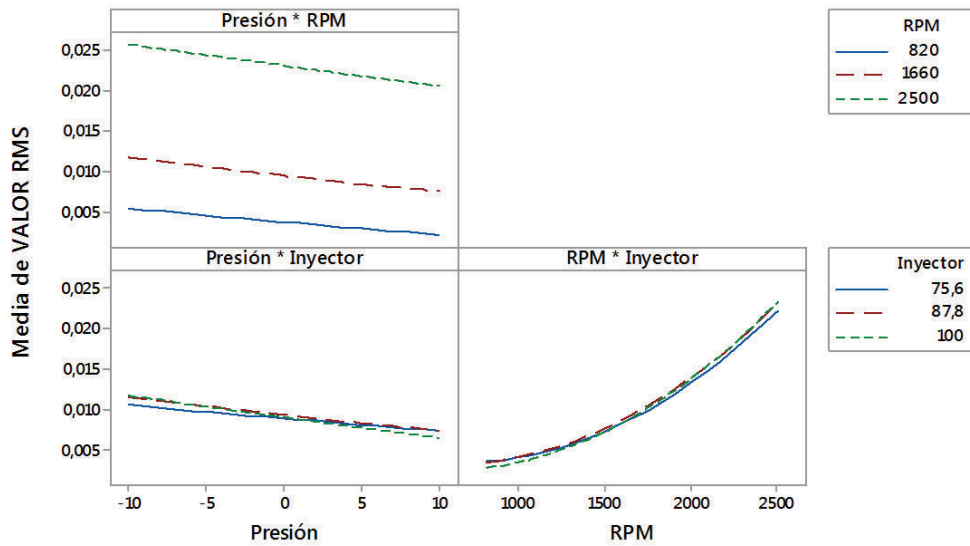


Figura 3.96. Gráfica de interacción para el valor RMS.¹⁷⁷

¹⁷⁶ Fuente: Los autores.

¹⁷⁷ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.6) que establece el comportamiento del valor RMS en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 94,17 \%$.

$$\begin{aligned} \text{VALOR RMS} = & -0,0077 + 0,000251 \text{ Presión} - 0,000011 \text{ RPM} + 0,000373 \text{ Inyector} \\ & + 0,000001 \text{ Presión}^2 + 0,000000 \text{ RPM}^2 - 0,000003 \text{ Inyector}^2 \\ & - 0,000004 \text{ Presión*Inyector} \end{aligned} \quad (3.6)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.97, que representa el comportamiento del valor RMS versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación del valor RMS, además en la figura 3.98 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

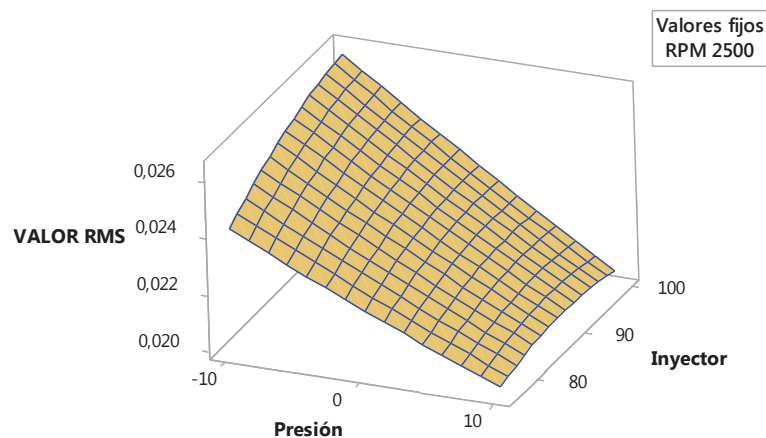


Figura 3.97. Gráfica de superficie del Valor RMS vs. Inyector. Presión.¹⁷⁸

¹⁷⁸ Fuente: Los autores.

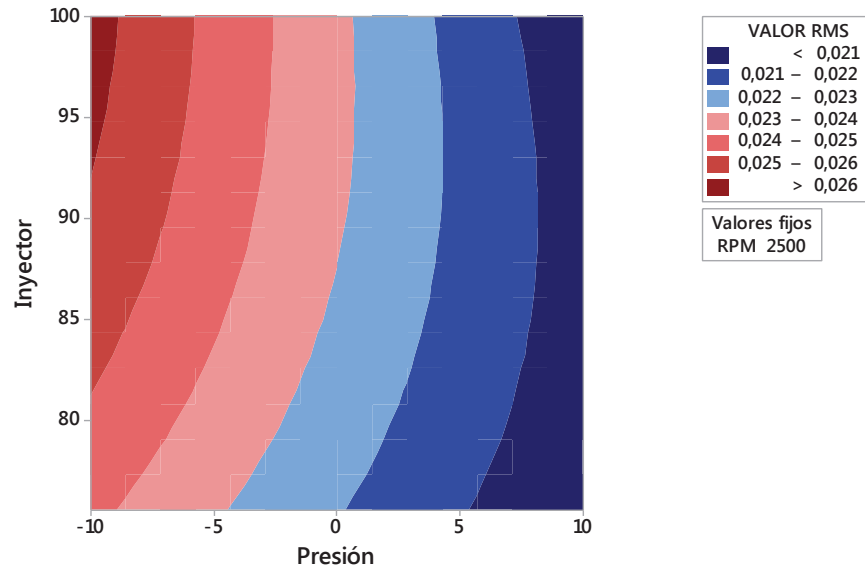


Figura 3.98. Gráfica de contorno del Valor RMS vs. Inyector. Presión.¹⁷⁹

En la figura 3.99 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor RMS versus estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel a - 10 bar, que es donde se da la mayor variación del valor RMS, además en la figura 3.100 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

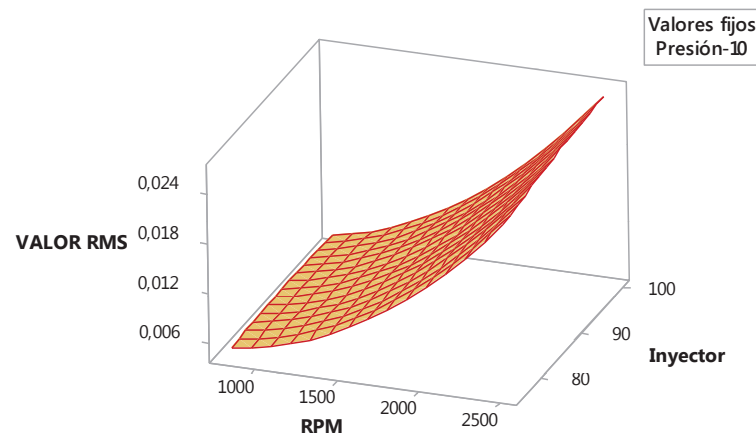


Figura 3.99. Gráfica de superficie del Valor RMS vs. Inyector. RPM.¹⁸⁰

¹⁷⁹ Fuente: Los autores.

¹⁸⁰ Fuente: Los autores.

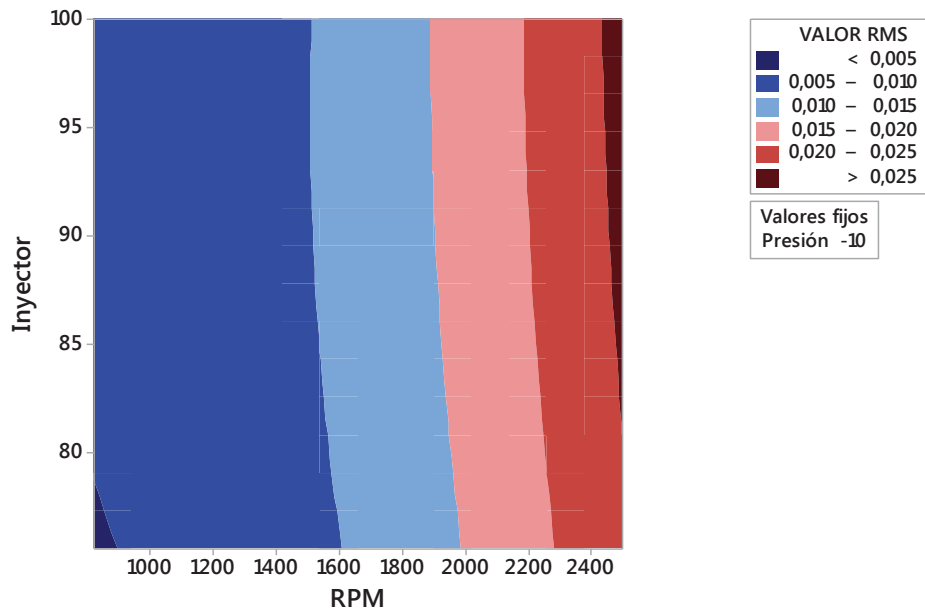


Figura 3.100. Gráfica de contorno del Valor RMS vs. Inyector. RPM.¹⁸¹

3.4.4.7 Análisis de diagramas del factor de cresta

En la figura 3.101 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del factor de cresta respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en el factor de cresta, seguido del factor estado físico del inyector, mientras que el factor presión de inyección en el riel posee poca influencia pues la curva tiende a una recta horizontal.

En la figura 3.102 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte en las tres gráficas, ya que existen cruces definidos en las mismas.

¹⁸¹ Fuente: Los autores.

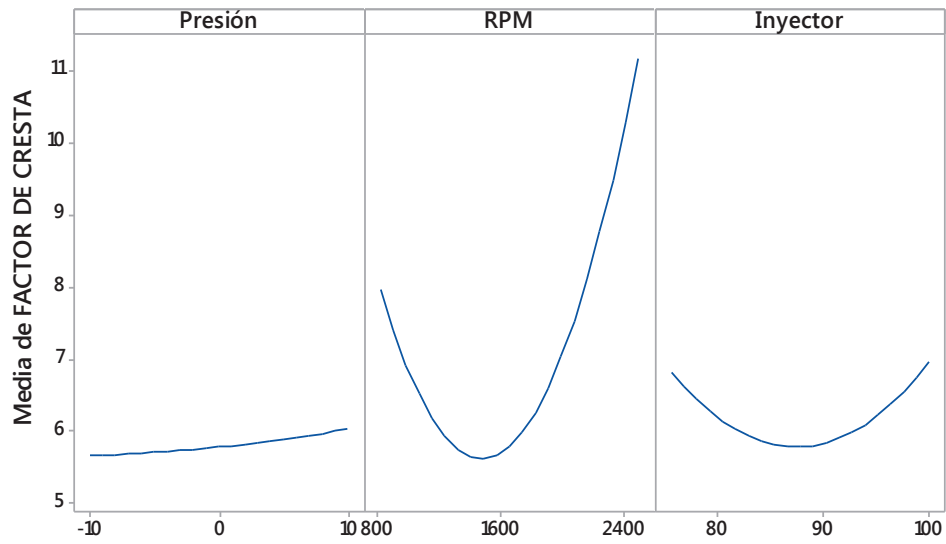


Figura 3.101. Gráfica de efectos principales para el factor de cresta.¹⁸²

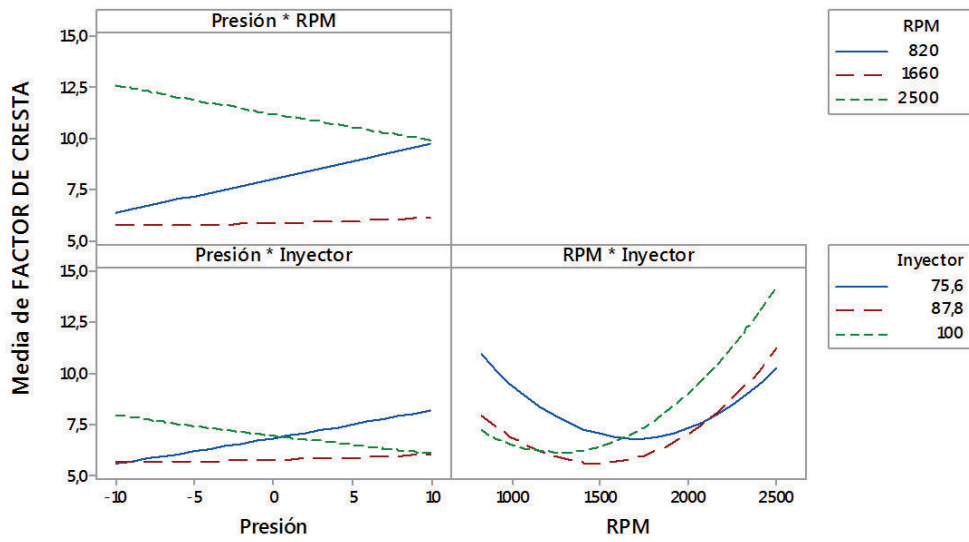


Figura 3.102. Gráfica de interacción para el factor de cresta.¹⁸³

¹⁸² Fuente: Los autores.

¹⁸³ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.7) que establece el comportamiento del factor de cresta en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 70 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FACTOR DE CRESTA} = & 101,9 + 1,129 \text{ Presión} - 0,03249 \text{ RPM} - 1,616 \text{ Inyector} \\ & + 0,00063 \text{ Presión}^2 + 0,000005 \text{ RPM}^2 + 0,00745 \text{ Inyector}^2 \\ & - 0,000182 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} - 0,00921 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} + 0,000189 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.7)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.103, que representa el comportamiento del factor de cresta versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación del factor de cresta, además en la figura 3.104 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

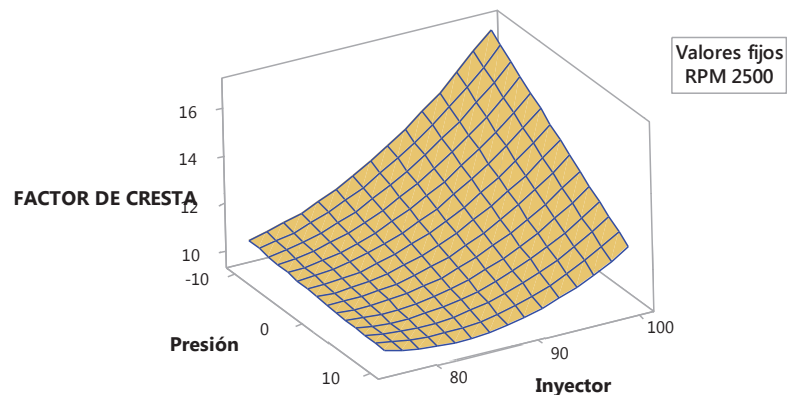


Figura 3.103. Gráfica de superficie del Factor de cresta vs. Inyector. Presión.¹⁸⁴

¹⁸⁴ Fuente: Los autores.

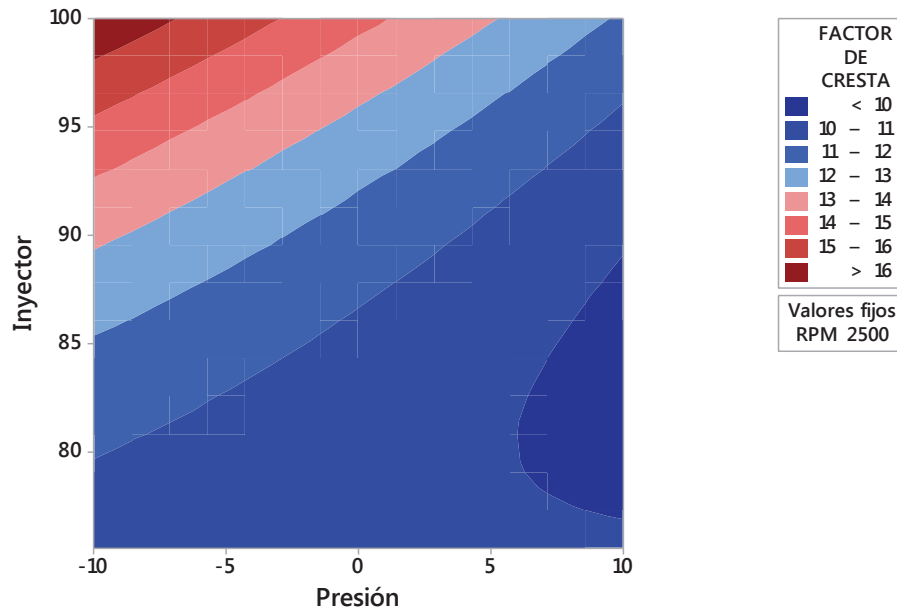
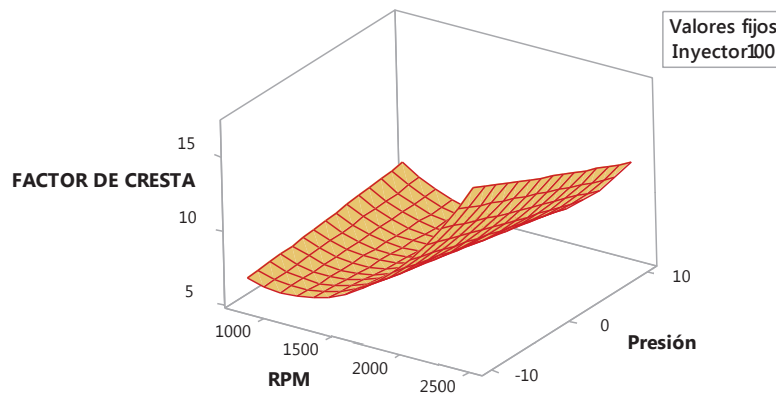


Figura 3.104. Gráfica de contorno del Factor de cresta vs. Inyector. Presión.¹⁸⁵

En la figura 3.105 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del factor de cresta versus presión de inyección en el riel y régimen de giro, tomando como valor fijo el estado físico del inyector a 100 %, que es donde se da la mayor variación del factor de cresta, además en la figura 3.106 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.



¹⁸⁵ Fuente: Los autores.

Figura 3.105. Gráfica de superficie del Factor de cresta vs. Presión. RPM.¹⁸⁶

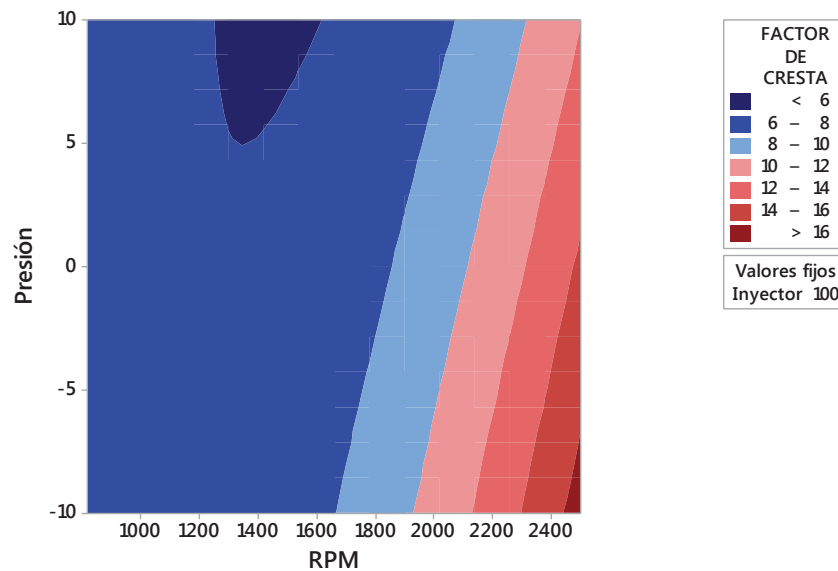


Figura 3.106. Gráfica de contorno del Factor de cresta vs. Presión. RPM.¹⁸⁷

3.4.4.8 Análisis de diagramas de la media

En la figura 3.107 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la media respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que la presión de inyección en el riel es el factor que más influye en la media, seguido del factor estado físico del inyector, mientras que el factor régimen de giro posee poca influencia con respecto a los dos factores anteriores.

En la figura 3.108 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte en las tres gráficas, ya que existen cruces definidos en las mismas.

¹⁸⁶ Fuente: Los autores.

¹⁸⁷ Fuente: Los autores.

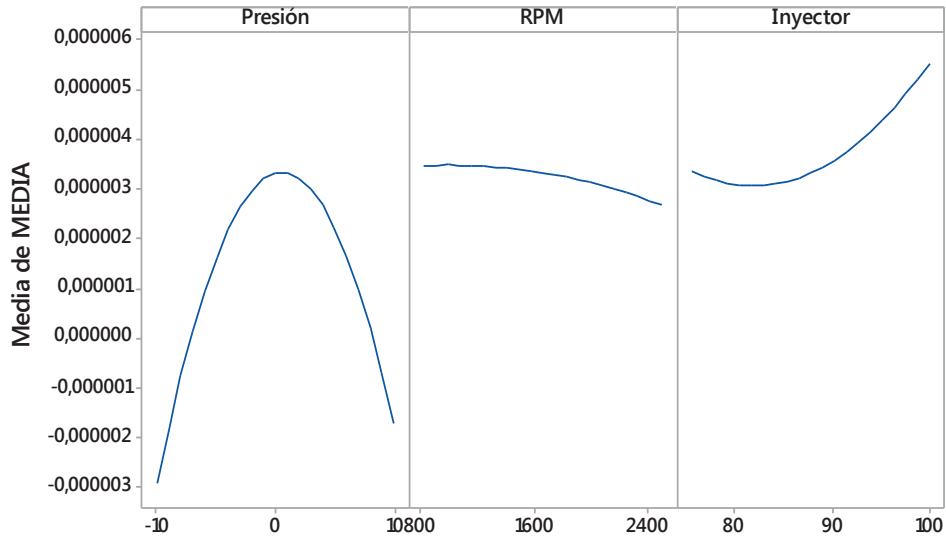


Figura 3.107. Gráfica de efectos principales para la media.¹⁸⁸

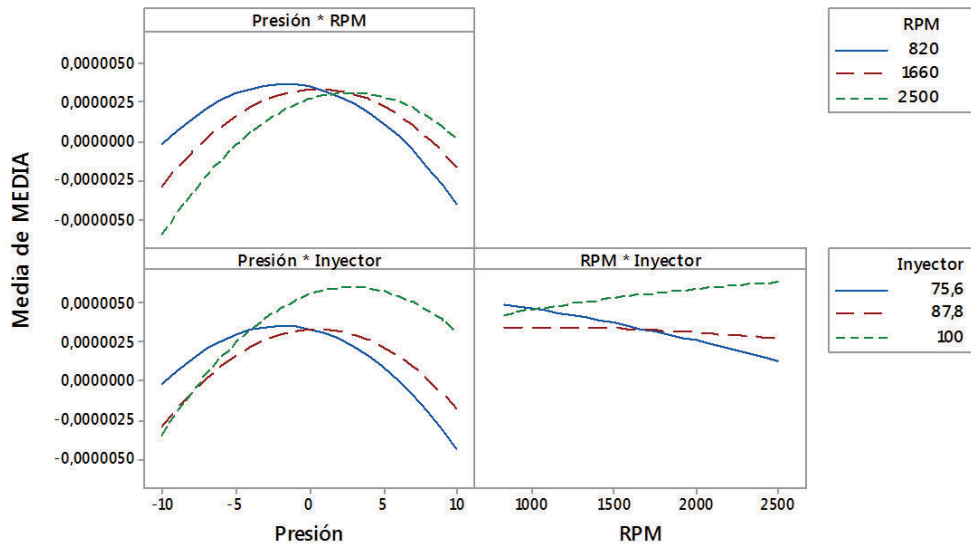


Figura 3.108. Gráfica de interacción para la media.¹⁸⁹

¹⁸⁸ Fuente: Los autores.

¹⁸⁹ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.8) que establece el comportamiento de la media en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 70,05 \%$.

$$\begin{aligned} \text{MEDIA} = & 0,000074 - 0,000002 \text{ Presión} - 0,0000001 \text{ RPM} - 0,000001 \text{ Inyector} \\ & - 0,0000001 \text{ Presión}^2 - 0,0000001 \text{ RPM}^2 + 0,0000001 \text{ Inyector}^2 \\ & + 0,0000001 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \end{aligned} \quad (3.8)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.109, que representa el comportamiento de la media versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación de la media, además en la figura 3.110 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

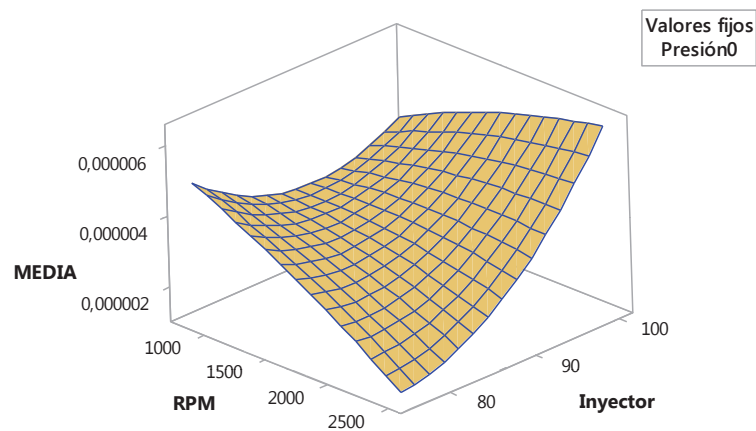


Figura 3.109. Gráfica de superficie de la media vs. Inyector. RPM.¹⁹⁰

¹⁹⁰ Fuente: Los autores.

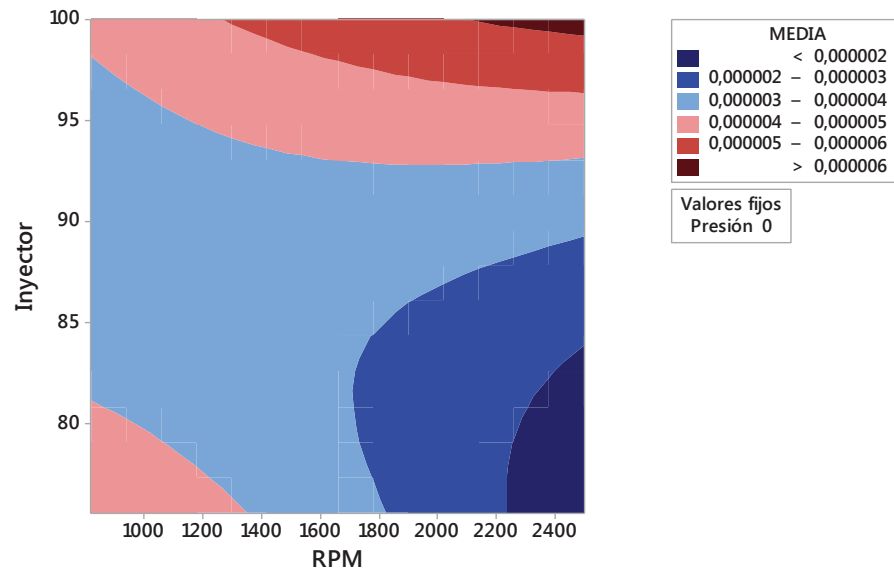


Figura 3.110. Gráfica de contorno de la media vs. Inyector. RPM.¹⁹¹

En la figura 3.111 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la media versus presión de inyección en el riel y régimen de giro, tomando como valor fijo el estado físico del inyector a 100 %, que es donde se da la mayor variación de la media, además en la figura 3.112 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

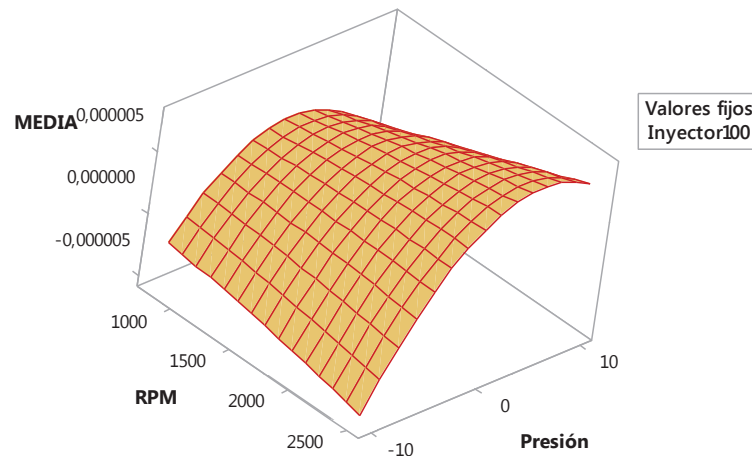


Figura 3.111. Gráfica de superficie de la Media vs. Presión. RPM.¹⁹²

¹⁹¹ Fuente: Los autores.

¹⁹² Fuente: Los autores.

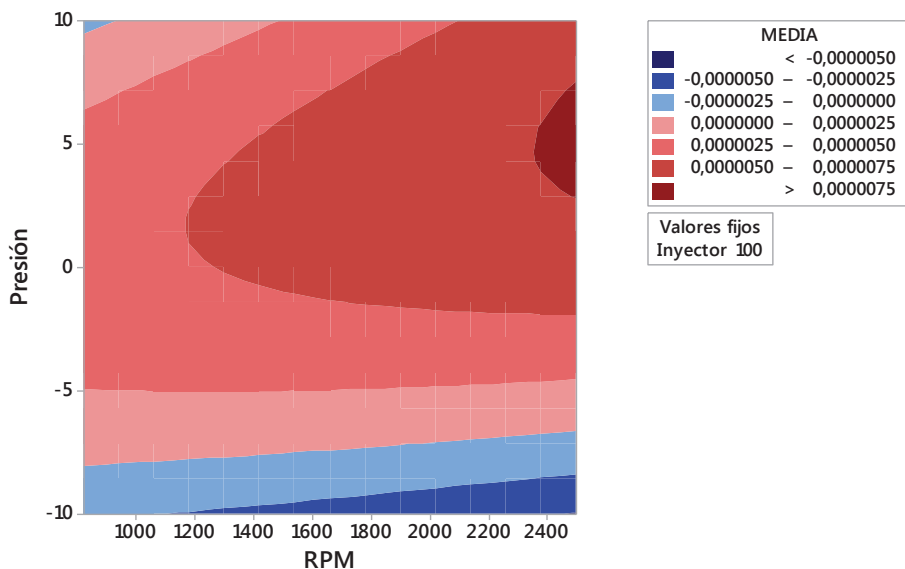


Figura 3.112. Gráfica de contorno de la Media vs. Presión. RPM.¹⁹³

3.4.4.9 Análisis de diagramas de la varianza

En la figura 3.113 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la varianza respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en la varianza, seguido del factor presión de inyección en el riel, mientras que el factor estado físico del inyector posee poca influencia pues la curva tiende a una recta horizontal.

En la figura 3.114 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector así como también entre el estado físico del inyector y régimen de giro, ya que existen cruces definidos en las gráficas.

¹⁹³ Fuente: Los autores.

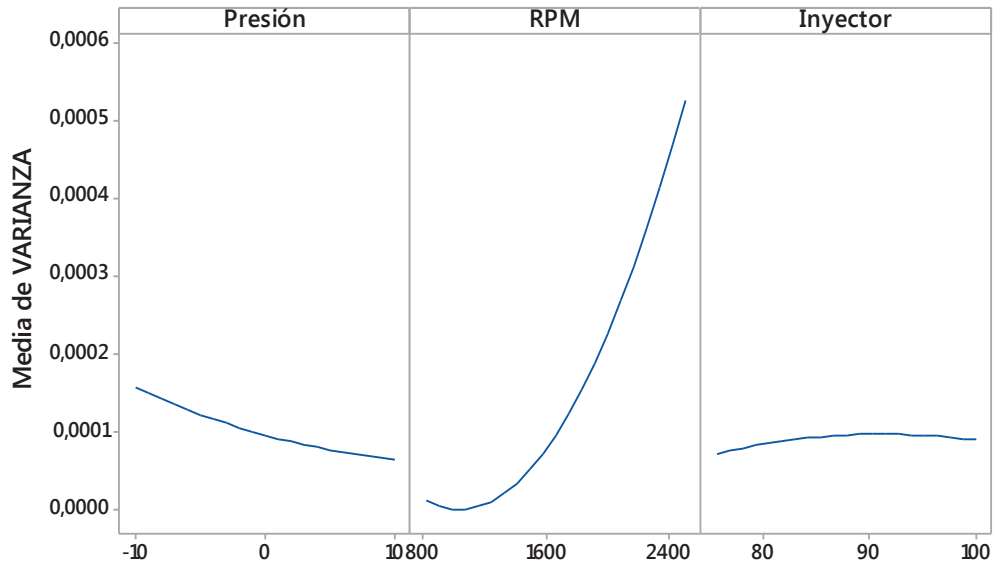


Figura 3.113. Gráfica de efectos principales para la varianza.¹⁹⁴

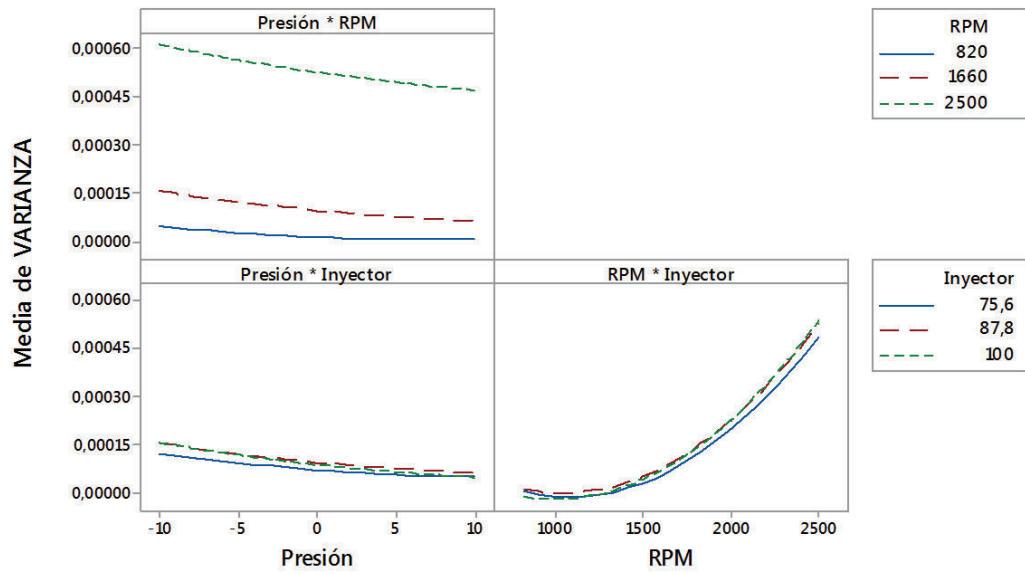


Figura 3.114. Gráfica de interacción para la varianza.¹⁹⁵

¹⁹⁴ Fuente: Los autores.

¹⁹⁵ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.9) que establece el comportamiento de la varianza en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 95,7 \%$.

$$\begin{aligned} \text{VARIANZA} = & -0,000341 + 0,000007 \text{ Presión} - 0,000001 \text{ RPM} + 0,000016 \text{ Inyector} \\ & + 0,0000001 \text{ Presión}^2 \quad + 0,0000001 \text{ RPM}^2 \quad - 0,0000001 \text{ Inyector}^2 \\ & - 0,0000001 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \quad - 0,0000001 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} \\ & + 0,0000001 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned}$$

(3.9)

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.115, que representa el comportamiento de la varianza versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación de la varianza, además en la figura 3.116 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

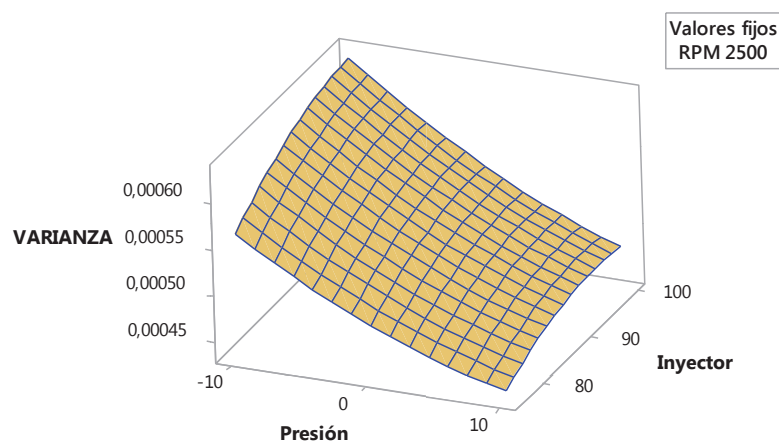


Figura 3.15. Gráfica de superficie de la Varianza vs. Inyector. Presión.¹⁹⁶

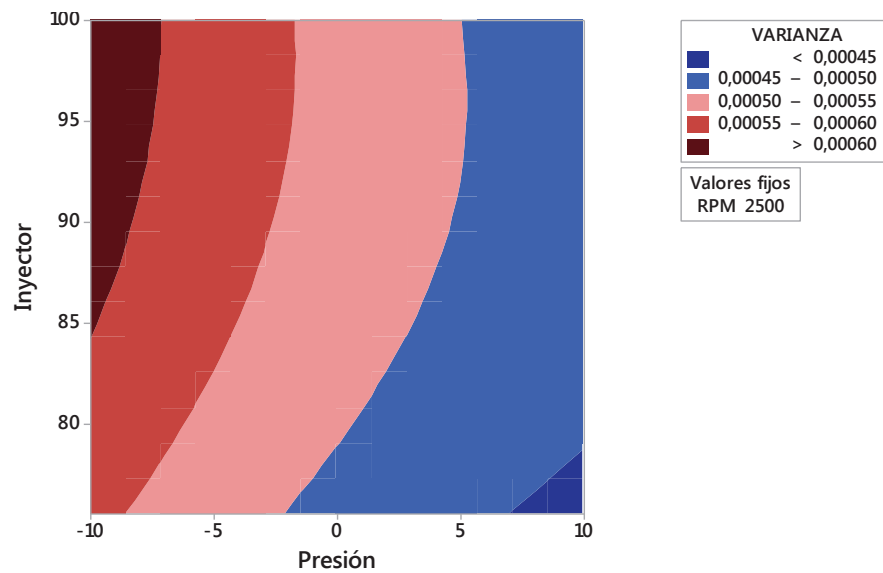
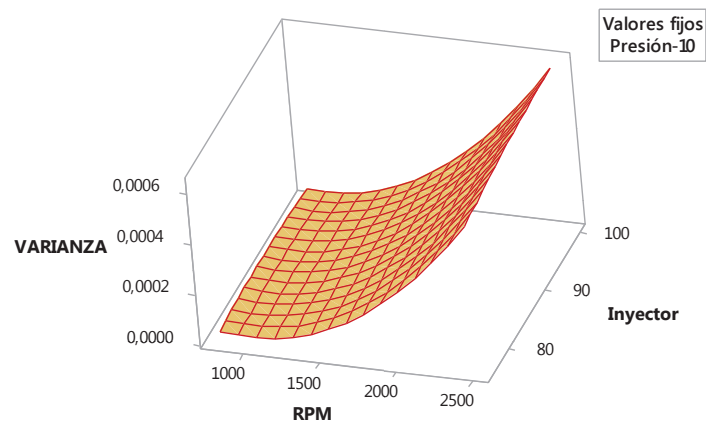


Figura 3.116. Gráfica de contorno de la Varianza vs. Inyector. Presión.¹⁹⁷

En la figura 3.117 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la varianza versus el estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel a -10 bar, que es donde se da la mayor variación de la varianza, además en la figura 3.118 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.



¹⁹⁶ Fuente: Los autores.

¹⁹⁷ Fuente: Los autores.

Figura 3.117. Gráfica de superficie de la Varianza vs. Inyector. RPM.¹⁹⁸

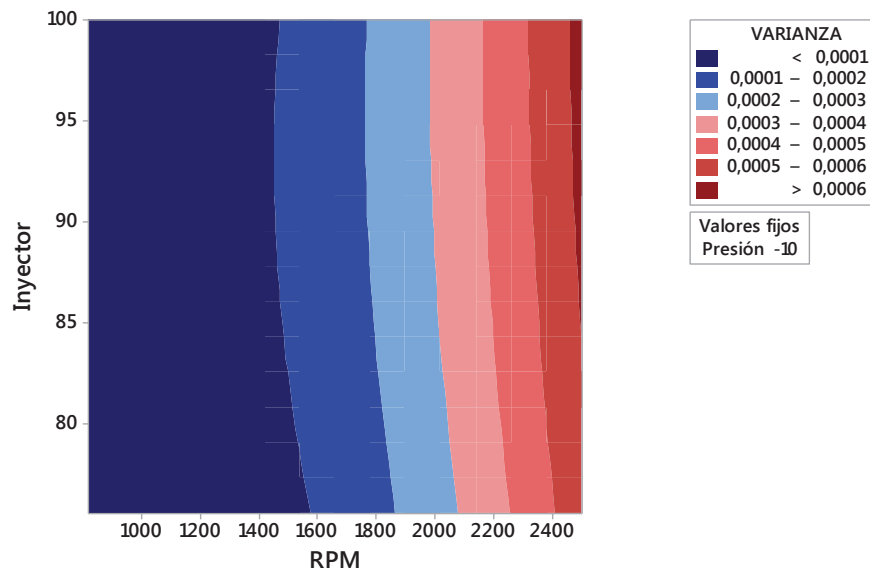


Figura 3.118. Gráfica de contorno de la Varianza vs. Inyector. RPM.¹⁹⁹

3.4.4.10 Análisis de diagramas de la desviación estándar

En la figura 3.119 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la desviación estándar respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en la desviación estándar, seguido del factor presión de inyección en el riel, mientras que el factor estado físico del inyector posee poca influencia pues la curva tiende a una recta horizontal.

En la figura 3.120 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector así como también entre el estado físico del inyector y régimen de giro, ya que existen cruces definidos en las gráficas.

¹⁹⁸ Fuente: Los autores.

¹⁹⁹ Fuente: Los autores.

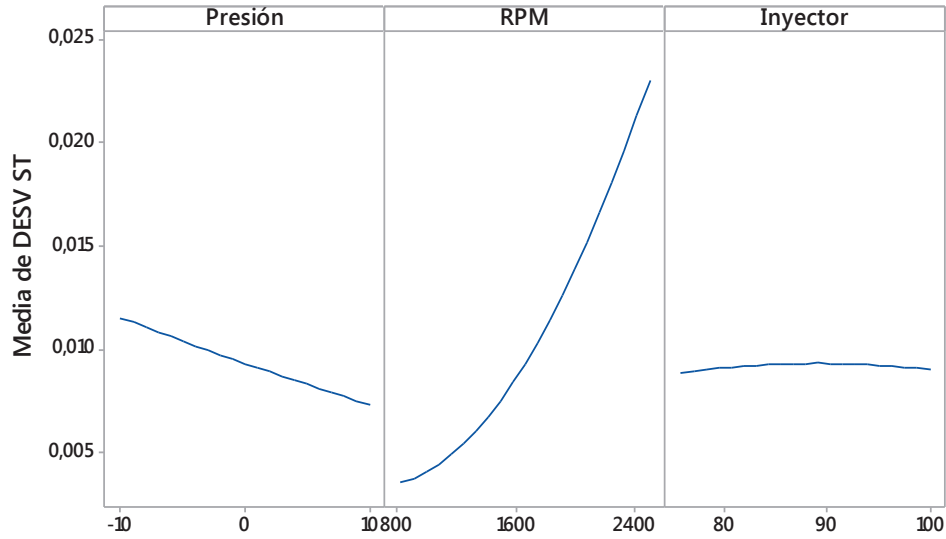


Figura 3.119. Gráfica de efectos principales para la desviación estándar.²⁰⁰

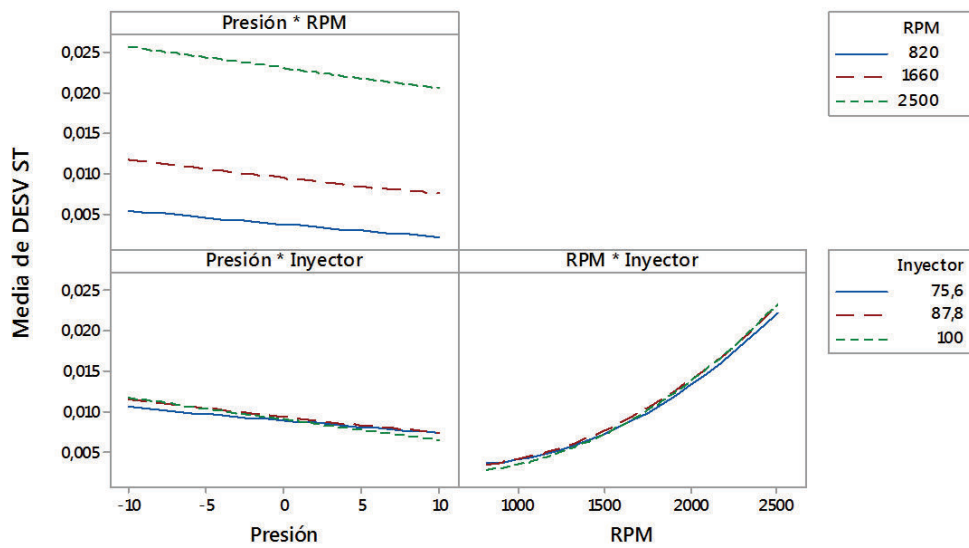


Figura 3.120. Gráfica de interacción para la desviación estándar.²⁰¹

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.10) que establece el comportamiento de la

²⁰⁰ Fuente: Los autores.

²⁰¹ Fuente: Los autores.

desviación estándar en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 94,17 \%$.

$$\begin{aligned} \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR} = & -0,0077 + 0,000251 \text{ Presión} - 0,000011 \text{ RPM} \\ & + 0,000373 \text{ Inyector} + 0,000001 \text{ Presión}^2 - 0,000003 \text{ Inyector}^2 \\ & - 0,000004 \text{ Presión*Inyector} \end{aligned} \quad (3.10)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.121, que representa el comportamiento de la desviación estándar versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación de la desviación estándar, además en la figura 3.122 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

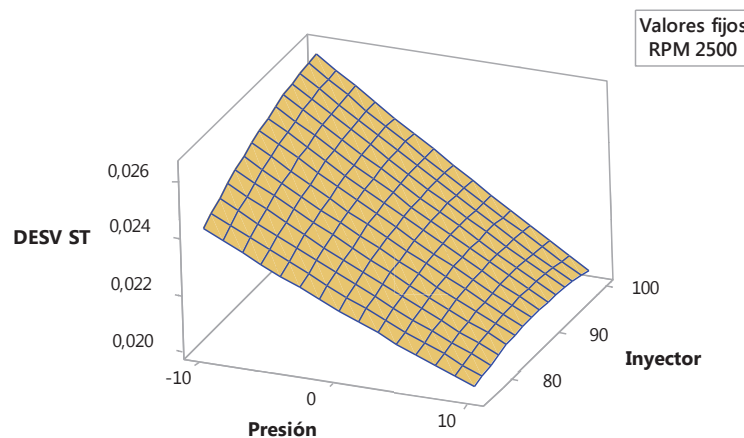


Figura 3.121. Gráfica de superficie de la Desviación estándar vs. Inyector. Presión.²⁰²

²⁰² Fuente: Los autores.

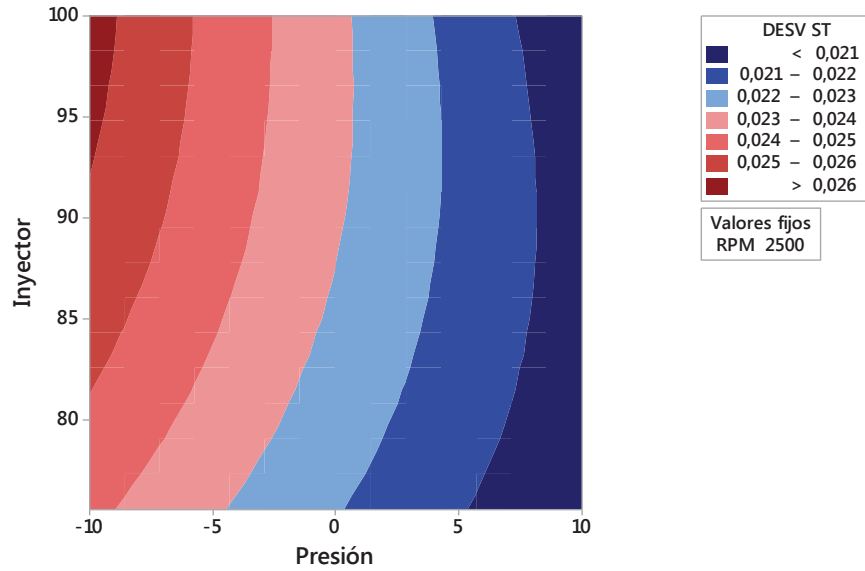


Figura 3.122. Gráfica de contorno de la Desviación estándar vs. Inyector. Presión.²⁰³

En la figura 3.123 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la desviación estándar versus el estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel a -10 bar, que es donde se da la mayor variación de la desviación estándar, además en la figura 3.124 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

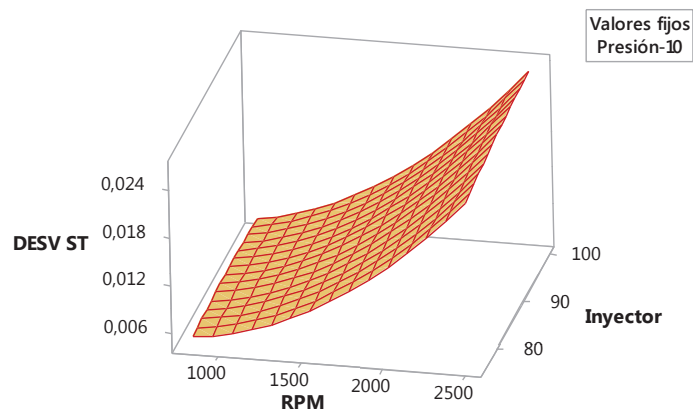


Figura 3.123. Gráfica de superficie de la Desviación estándar vs. Inyector. RPM.²⁰⁴

²⁰³ Fuente: Los autores.

²⁰⁴ Fuente: Los autores.

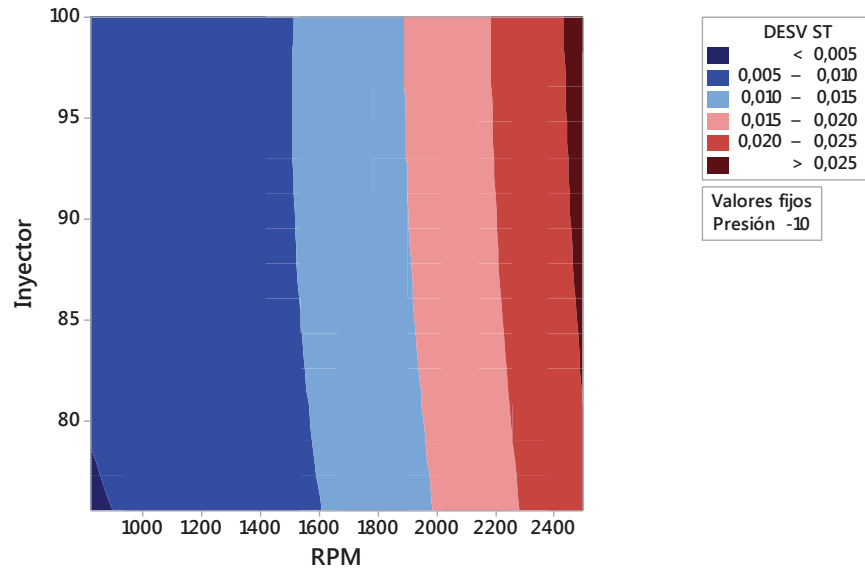


Figura 3.124. Gráfica de contorno de la Desviación estándar vs. Inyector. RPM.²⁰⁵

3.4.4.11 Análisis de diagramas del valor máximo

En la figura 3.125 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor máximo respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en el valor máximo, seguido del factor presión de inyección en el riel, mientras que el factor estado físico del inyector posee menor influencia con respecto a los otros dos factores.

En la figura 3.126 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte en las tres gráficas, ya que existen cruces definidos en las mismas.

²⁰⁵ Fuente: Los autores.

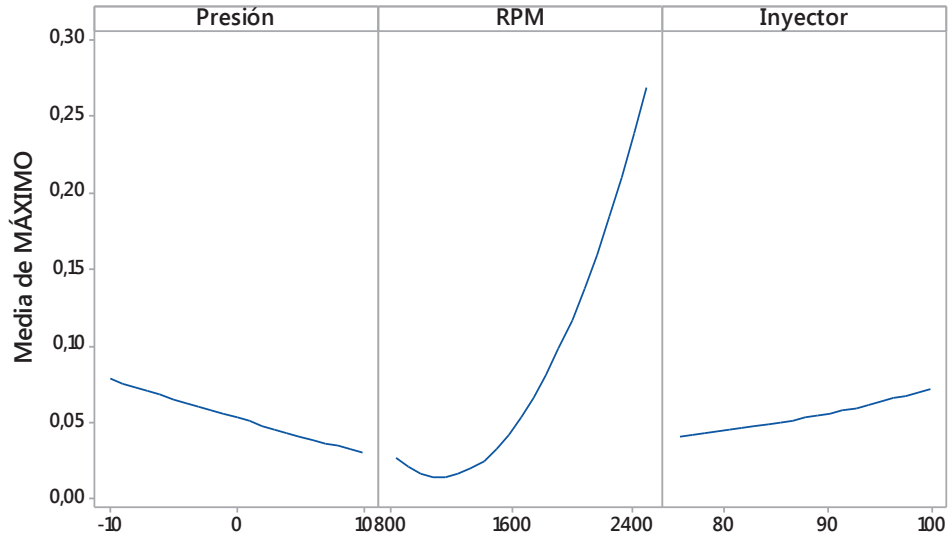


Figura 3.125. Gráfica de efectos principales para el valor máximo.²⁰⁶

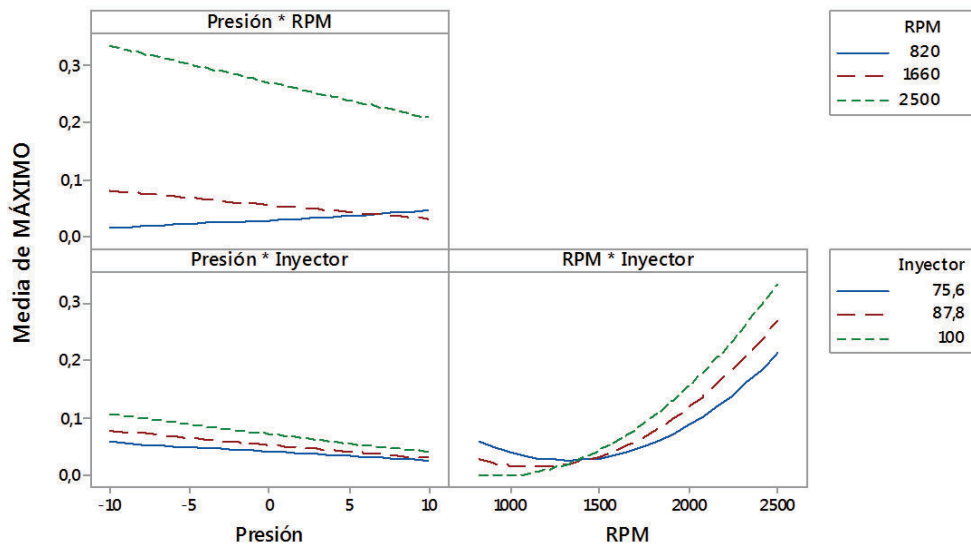


Figura 3.126. Gráfica de interacción para el valor máximo.²⁰⁷

²⁰⁶ Fuente: Los autores.

²⁰⁷ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.11) que establece el comportamiento del valor máximo en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 94,98 \%$.

$$\begin{aligned} \text{MÁXIMO} = & 0,895 + 0,01154 \text{ Presión} - 0,000690 \text{ RPM} - 0,01012 \text{ Inyector} \\ & + 0,000013 \text{ Presión}^2 + 0,000023 \text{ Inyector}^2 - 0,000005 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \\ & - 0,000071 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} + 0,000004 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.11)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.127, que representa el comportamiento del valor máximo versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación del valor máximo, además en la figura 3.128 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

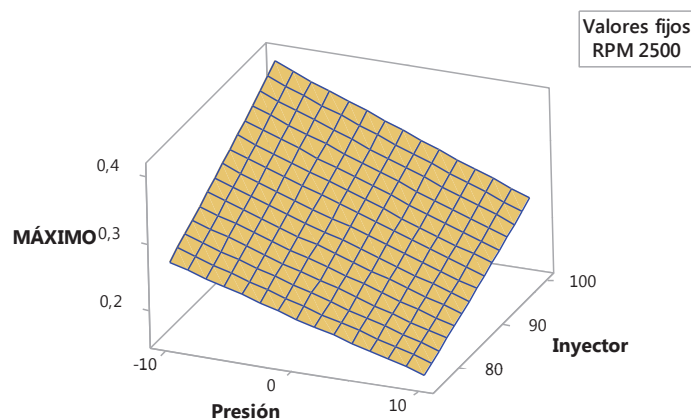


Figura 3.127. Gráfica de superficie del valor máximo vs. Inyector. Presión.²⁰⁸

²⁰⁸ Fuente: Los autores.

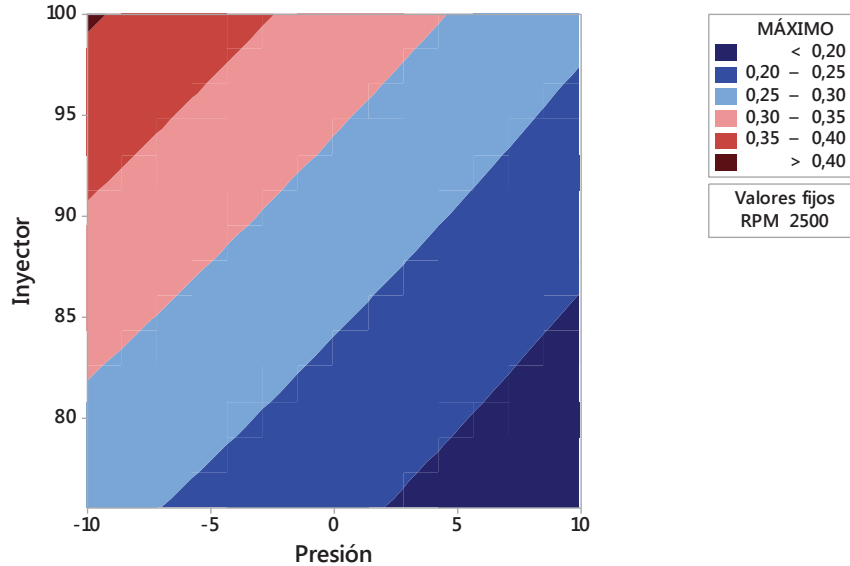


Figura 3.128. Gráfica de contorno del valor máximo vs. Inyector. Presión.²⁰⁹

En la figura 3.129 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor máximo versus el estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel a -10 bar, que es donde se da la mayor variación del valor máximo, además en la figura 3.130 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

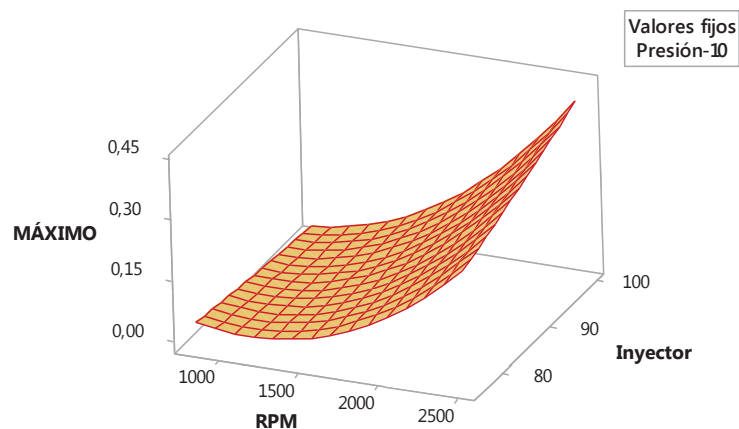


Figura 3.129. Gráfica de superficie del valor máximo vs. Inyector. RPM.²¹⁰

²⁰⁹ Fuente: Los autores.

²¹⁰ Fuente: Los autores.

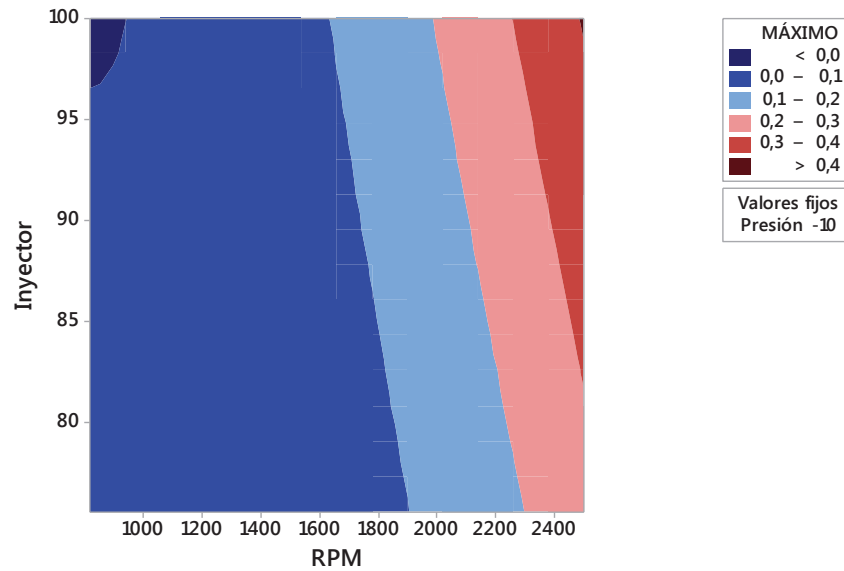


Figura 3.130. Gráfica de contorno del valor máximo vs. Inyector. RPM.²¹¹

3.4.4.12 Análisis de diagramas del valor mínimo

En la figura 3.131 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor mínimo respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en el valor mínimo, seguido del factor presión de inyección en el riel, mientras que el factor estado físico del inyector posee menor influencia con respecto a los otros dos factores.

En la figura 3.132 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte en las tres gráficas, ya que existen cruces definidos en las mismas.

²¹¹ Fuente: Los autores.

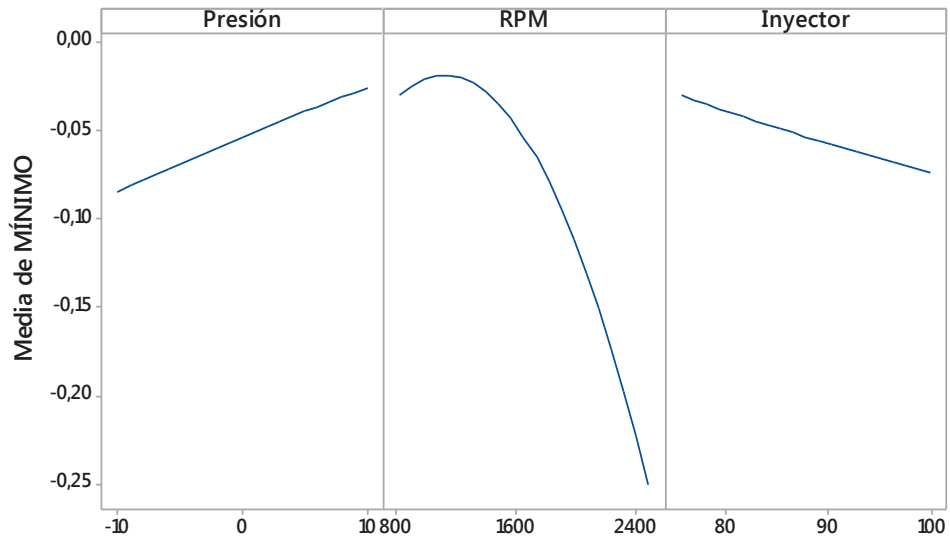


Figura 3.131. Gráfica de efectos principales para el valor mínimo.²¹²

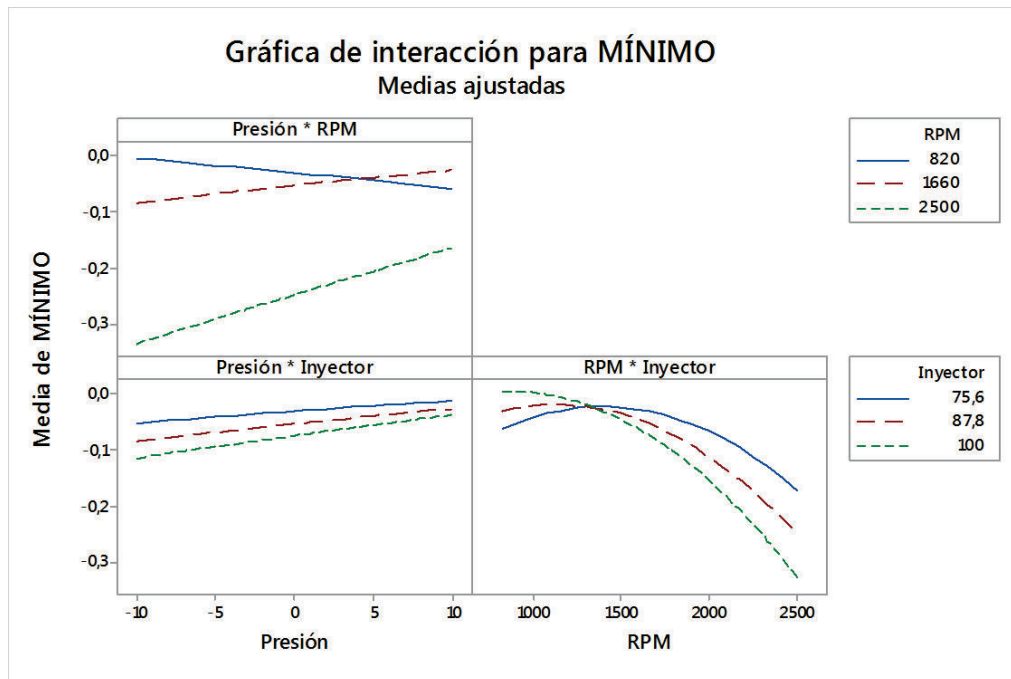


Figura 3.132. Gráfica de interacción para el valor mínimo.²¹³

²¹² Fuente: Los autores.

²¹³ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.12) que establece el comportamiento del valor mínimo en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 92,22 \%$.

$$\begin{aligned} \text{MÍNIMO} = & -0,747 - 0,01469 \text{ Presión} + 0,000754 \text{ RPM} + 0,0058 \text{ Inyector} \\ & - 0,000018 \text{ Presión}^2 + 0,000008 \text{ Inyector}^2 + 0,000007 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \\ & + 0,000074 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} - 0,000005 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.12)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.133, que representa el comportamiento del valor mínimo versus el estado físico del inyector y presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 820 rpm que es donde se da la mayor variación del valor mínimo, además en la figura 3.134 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

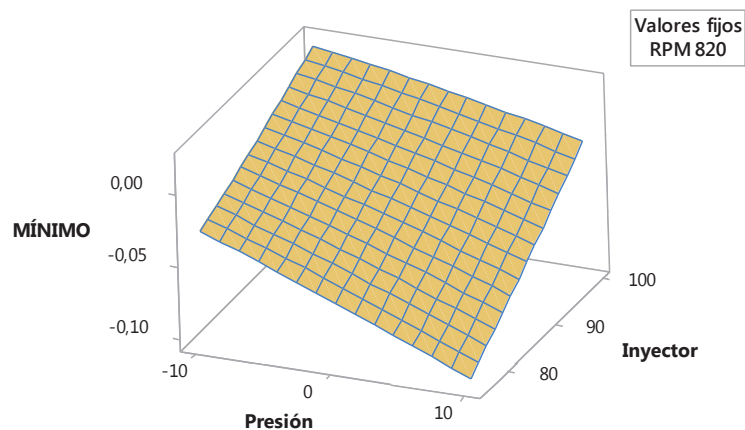


Figura 3.133. Gráfica de superficie del valor mínimo vs. Inyector. Presión.²¹⁴

²¹⁴ Fuente: Los autores.

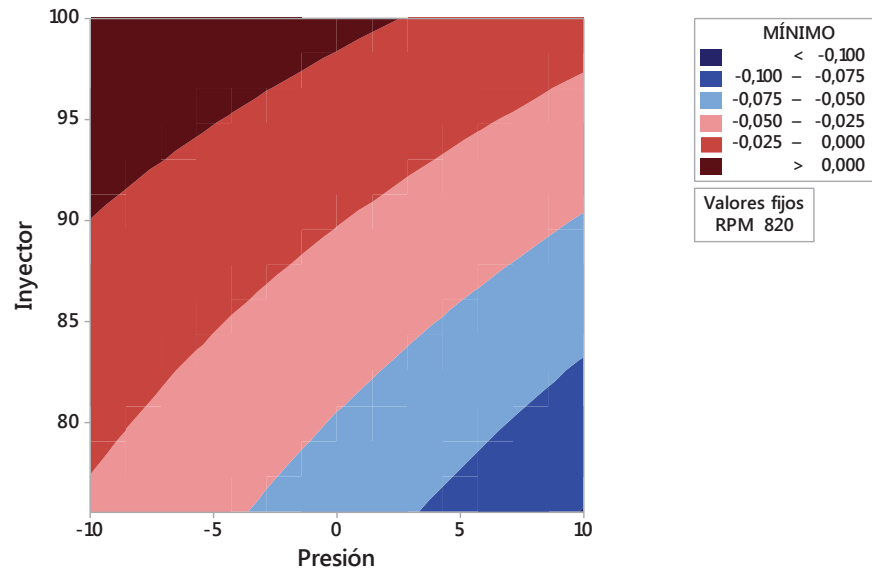


Figura 3.134. Gráfica de contorno del valor mínimo vs. Inyector. Presión.²¹⁵

En la figura 3.135 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor mínimo versus el estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel a 10 bar, que es donde se da la mayor variación del valor mínimo, y en la figura 3.136 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

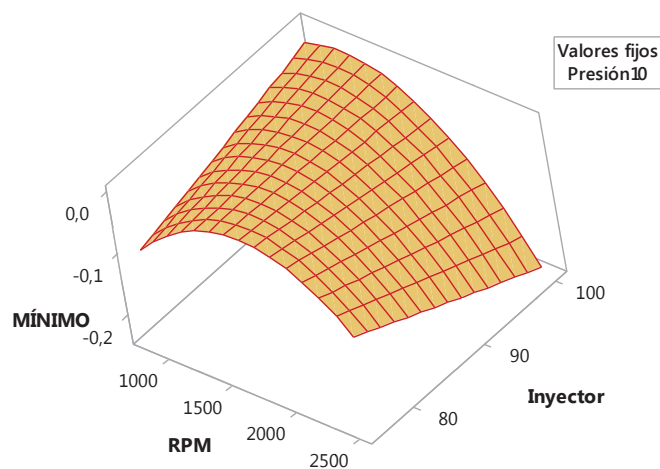


Figura 3.135. Gráfica de superficie del valor mínimo vs. Inyector. RPM.²¹⁶

²¹⁵ Fuente: Los autores.

²¹⁶ Fuente: Los autores.

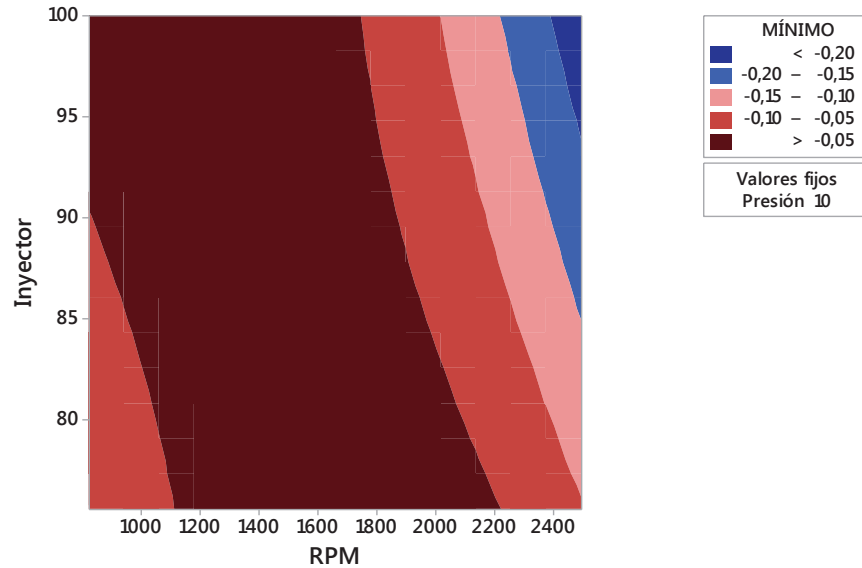


Figura 3.136. Gráfica de contorno del valor mínimo vs. Inyector. RPM.²¹⁷

3.4.4.13 Análisis de diagramas de potencia en intervalo de frecuencia

En la figura 3.137 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la potencia en intervalo de frecuencia respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en la potencia en intervalo de frecuencia, seguido de la presión de inyección en el riel y del estado físico del inyector.

En la figura 3.138 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el régimen de giro así como también entre el régimen de giro y el estado físico del inyector, ya que existen cruces definidos en las gráficas; entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector se presenta una interacción más débil.

²¹⁷ Fuente: Los autores.

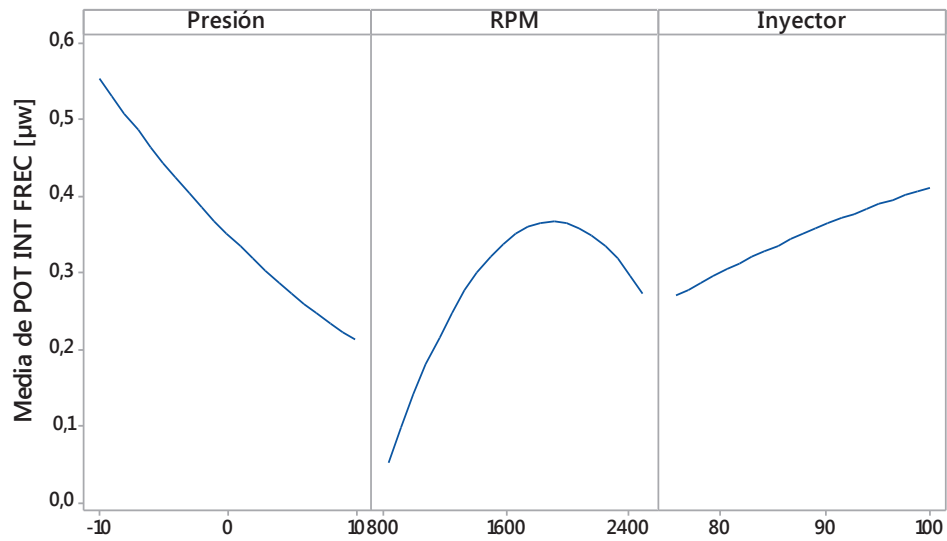


Figura 3.137. Gráfica de efectos principales para la potencia en intervalo de frecuencia [μW].²¹⁸

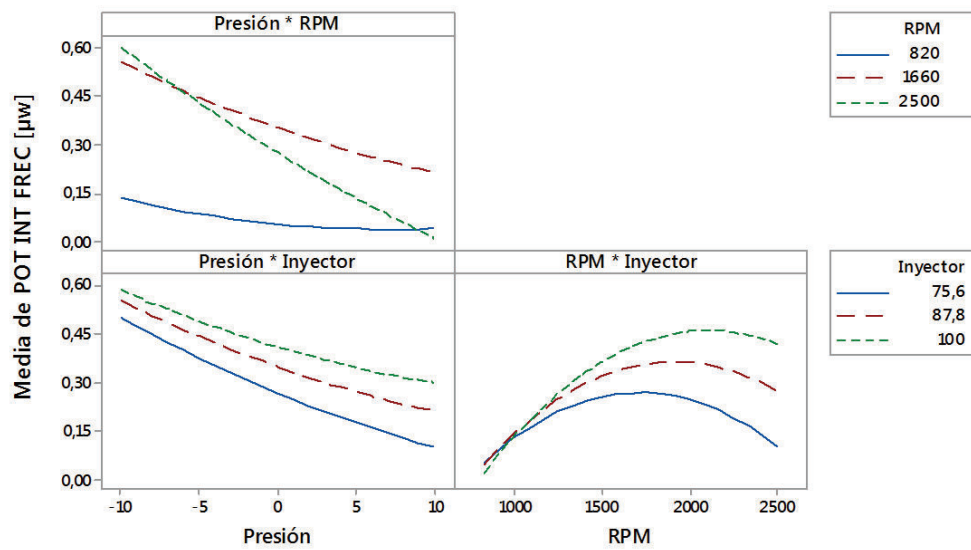


Figura 3.138. Gráfica de interacción para la la potencia en intervalo de frecuencia [μW].²¹⁹

²¹⁸ Fuente: Los autores.

²¹⁹ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.13) que establece el comportamiento de la potencia en intervalo de frecuencia en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 78,66 \%$.

$$\begin{aligned} \text{POT INT FREC } [\mu\text{w}] = & -0,41 - 0,0130 \text{ Presión} + 0,000273 \text{ RPM} + 0,0038 \text{ Inyector} \\ & + 0,000322 \text{ Presión}^2 - 0,000069 \text{ Inyector}^2 - 0,000015 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \\ & + 0,000234 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} + 0,000008 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.13)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.139, que representa el comportamiento de la potencia en intervalo de frecuencia versus la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector, tomando como valor fijo el régimen de giro a 1900 rpm que es donde se da la mayor variación de potencia en intervalo de frecuencia, además en la figura 3.140 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

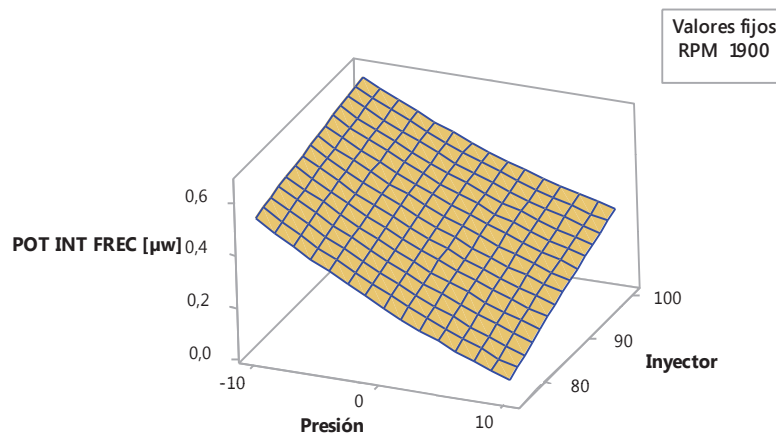


Figura 3.139. Gráfica de superficie de Potencia en intervalo de frecuencia [μW] vs. Inyector. Presión.²²⁰

²²⁰ Fuente: Los autores.

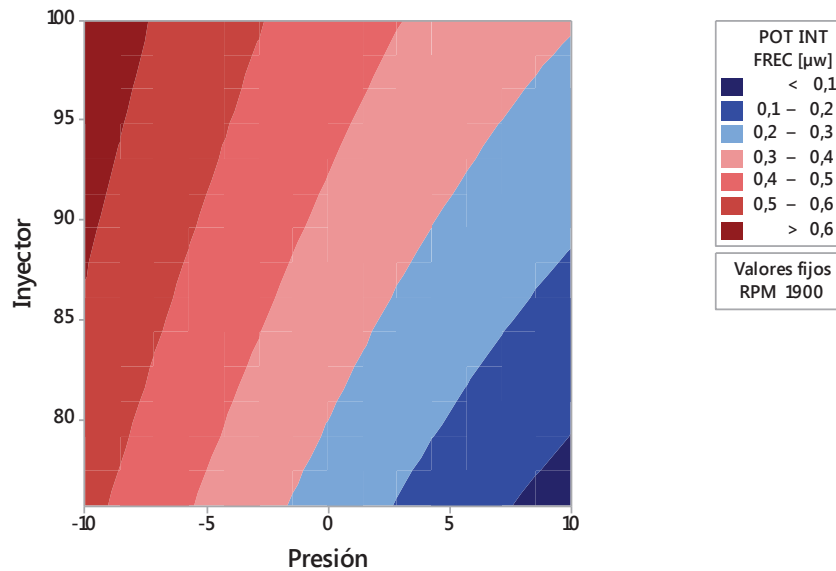


Figura 3.140. Gráfica de contorno de Potencia en intervalo de frecuencia [μ W] vs. Inyector. Presión.²²¹

En la figura 3.141 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la potencia en intervalo de frecuencia versus régimen de giro y el estado físico del inyector, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel de -10, que es donde se da la mayor variación de la potencia en intervalo de frecuencia, y en la figura 3.142 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

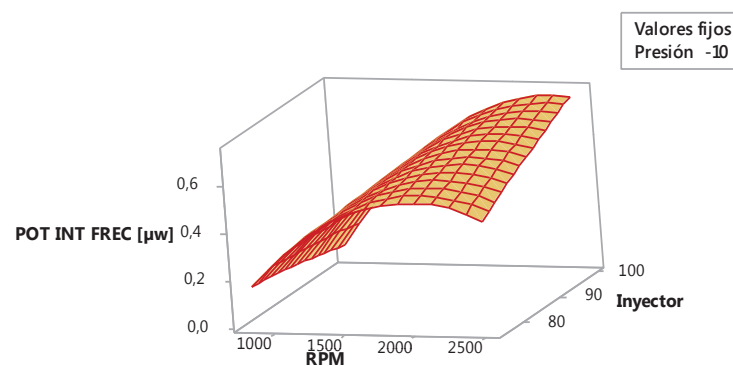


Figura 3.141. Gráfica de superficie de Potencia en intervalo de frecuencia [μ W] vs. Inyector. RPM.²²²

²²¹ Fuente: Los autores.

²²² Fuente: Los autores.

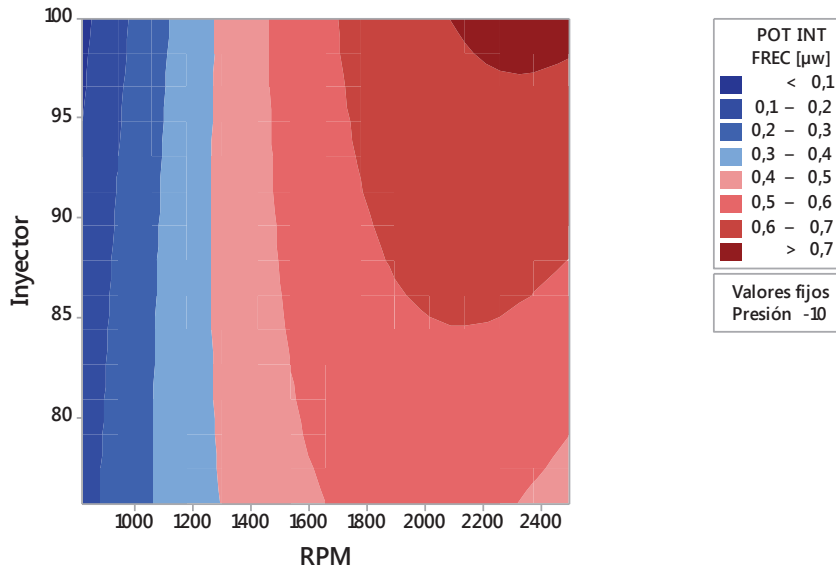


Figura 3.142. Gráfica de contorno de Potencia en intervalo de frecuencia [μW] vs. Inyector.
RPM.²²³

3.4.4.14 Análisis de diagramas de Energía

En la figura 3.143 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento de la energía respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en la energía, seguido de la presión de inyección en el riel y del estado físico del inyector.

En la figura 3.144 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el régimen de giro ya que las rectas no son paralelas, la interacción entre el régimen de giro y el estado físico del inyector y la interacción entre la presión de inyección en el riel y del estado físico del inyector, son más débiles.

²²³ Fuente: Los autores.

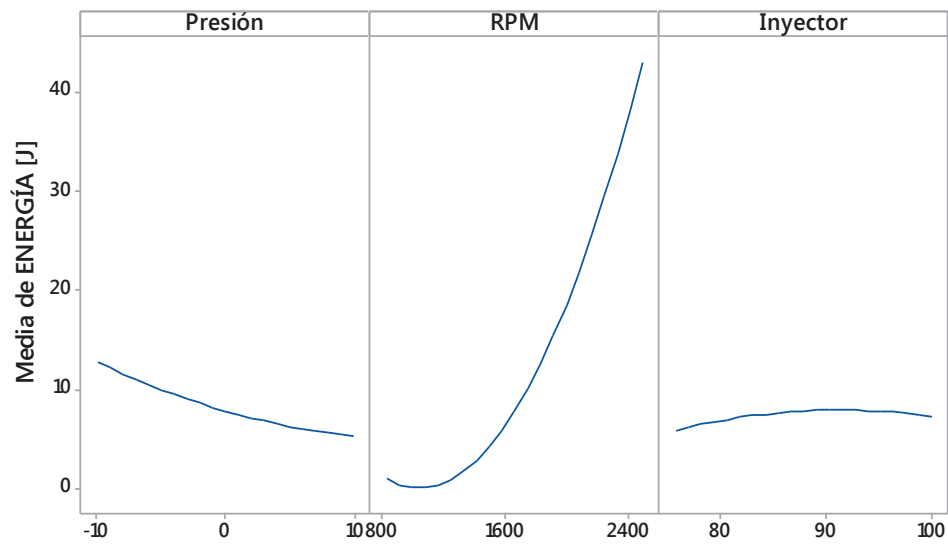


Figura 3.143. Gráfica de efectos principales para energía [J].²²⁴

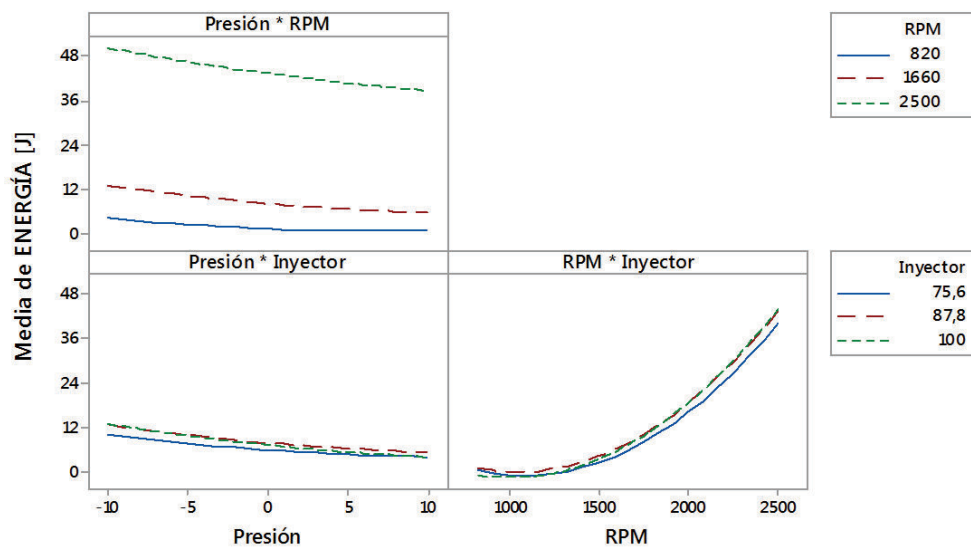


Figura 3.144. Gráfica de interacción para energía [J].²²⁵

²²⁴ Fuente: Los autores.

²²⁵ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.14) que establece el comportamiento de la energía en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 95,70 \%$.

$$\begin{aligned} \text{ENERGÍA [J]} = & -28,0 + 0,538 \text{ Presión} - 0,0533 \text{ RPM} + 1,29 \text{ Inyector} \\ & + 0,0120 \text{ Presión}^2 + 0,000020 \text{ RPM}^2 - 0,00830 \text{ Inyector}^2 - 0,000244 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \\ & - 0,00576 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} + 0,000133 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.14)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.145, que representa el comportamiento de la energía versus la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación de energía, además en la figura 3.146 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

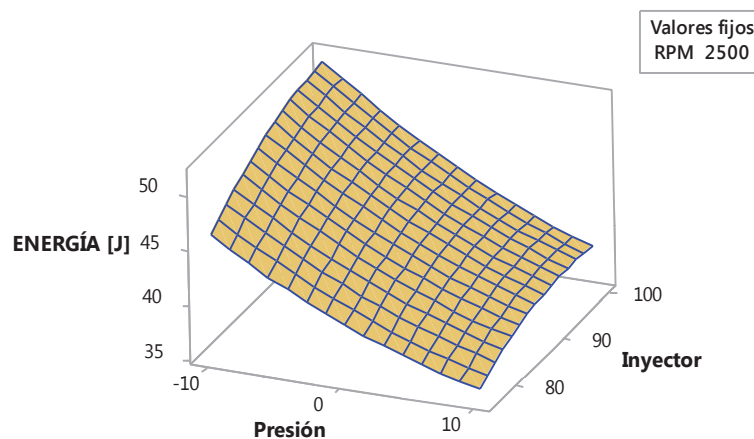


Figura 3.145. Gráfica de superficie de Energía [J] vs. Inyector. Presión.²²⁶

²²⁶ Fuente: Los autores.

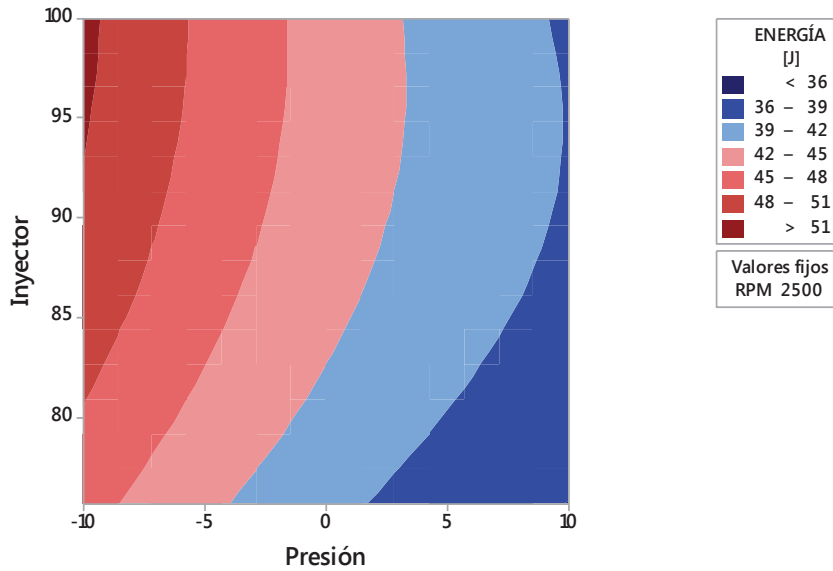


Figura 3.146. Gráfica de contorno de Energía [J] vs. Inyector. Presión.²²⁷

En la figura 3.147 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento de la energía versus régimen de giro y el estado físico del inyector, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel de -10, que es donde se da la mayor variación de la energía, además en la figura 3.148 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

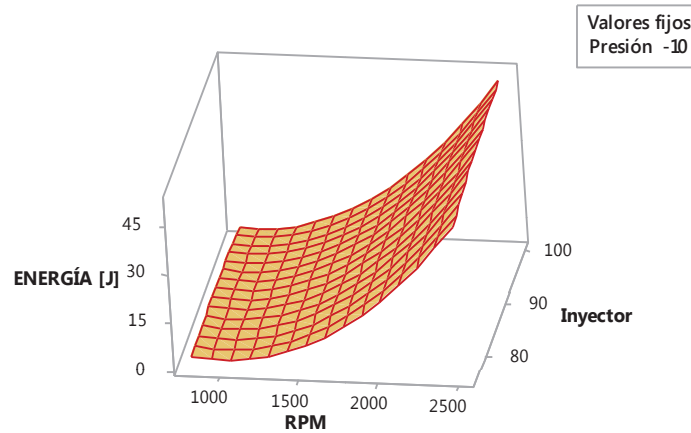


Figura 3.147. Gráfica de superficie de Energía [J] vs. Inyector. RPM.²²⁸

²²⁷ Fuente: Los autores.

²²⁸ Fuente: Los autores.

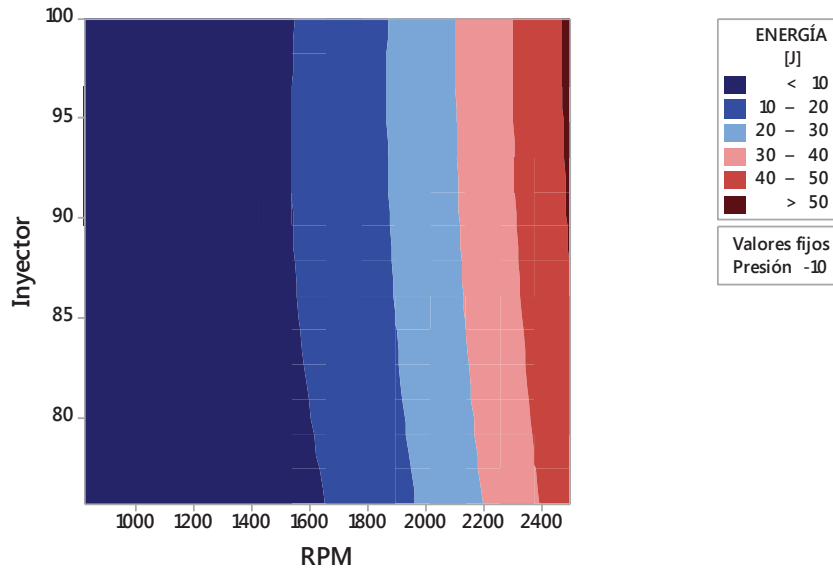


Figura 3.148. Gráfica de contorno de Energía [J] vs. Inyector. RPM.²²⁹

3.4.4.15 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico

En la figura 3.149 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en este valor de frecuencia, seguido del estado físico del inyector y de la presión de inyección en el riel.

En la figura 3.150 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte en las tres gráficas ya que existen en un caso líneas no paralelas y en los otros cruces definidos.

²²⁹ Fuente: Los autores.

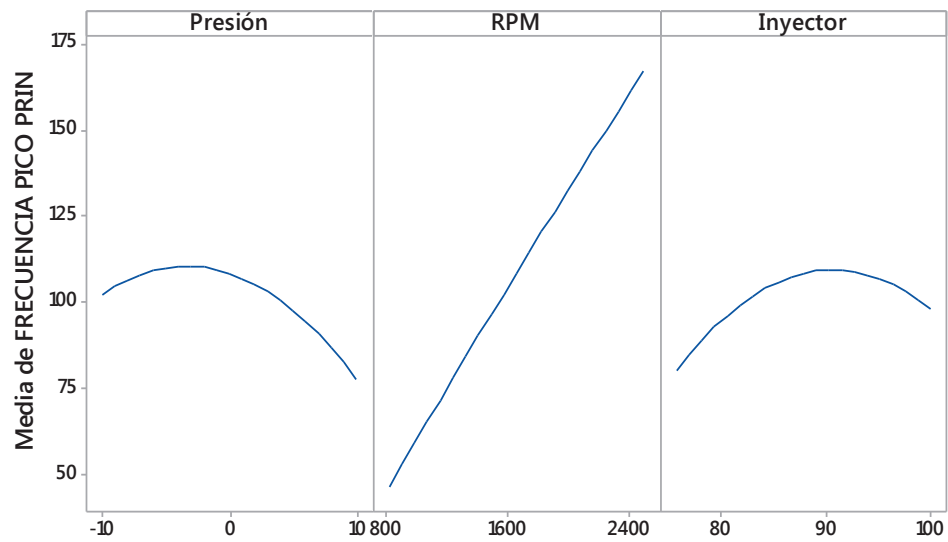


Figura 3.149. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.²³⁰

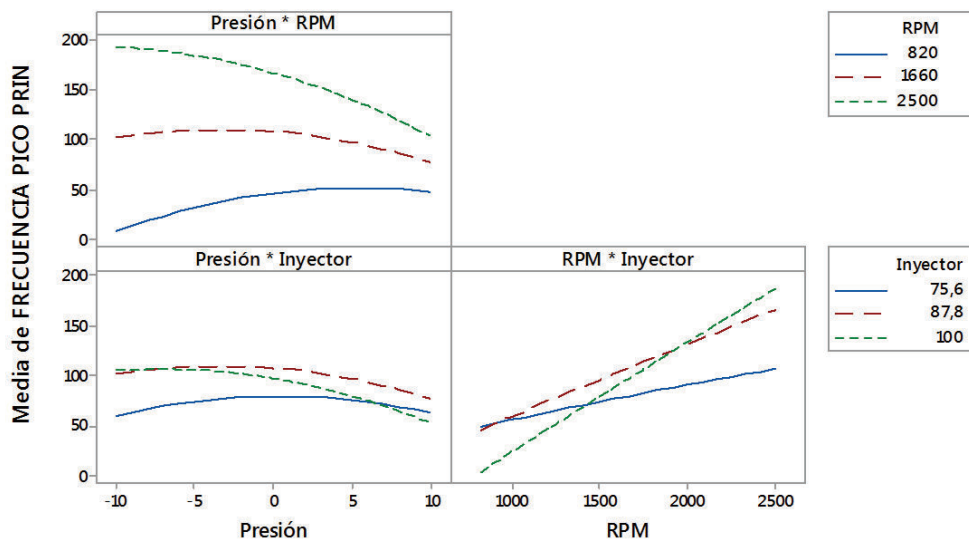


Figura 3.150. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico.²³¹

²³⁰ Fuente: Los autores.

²³¹ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.15) que establece el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 71,38 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FRECUENCIA PICO PRIN} = & -641 + 15,2 \text{ Presión} - 0,191 \text{ RPM} + 18,6 \text{ Inyector} \\ & - 0,184 \text{ Presión}^2 - 0,000002 \text{ RPM}^2 - 0,1308 \text{ Inyector}^2 - 0,00386 \text{ Presión} * \text{RPM} \\ & - 0,115 \text{ Presión} * \text{Inyector} + 0,00308 \text{ RPM} * \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.15)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.151, que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico versus el estado físico del inyector y la presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm que es donde se da la mayor variación del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico, además en la figura 3.152 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

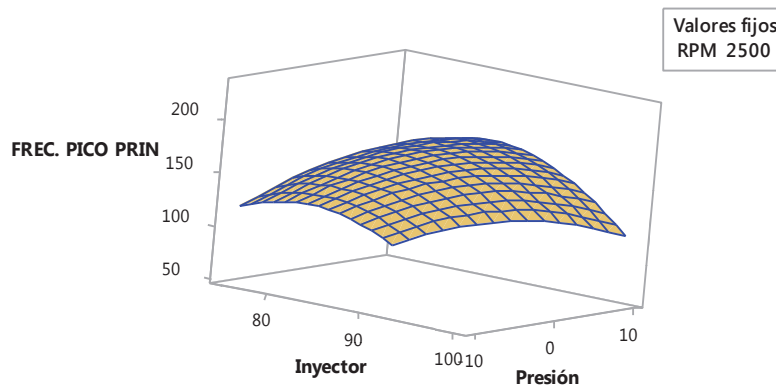


Figura 3.151. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. Inyector.²³²

²³² Fuente: Los autores.

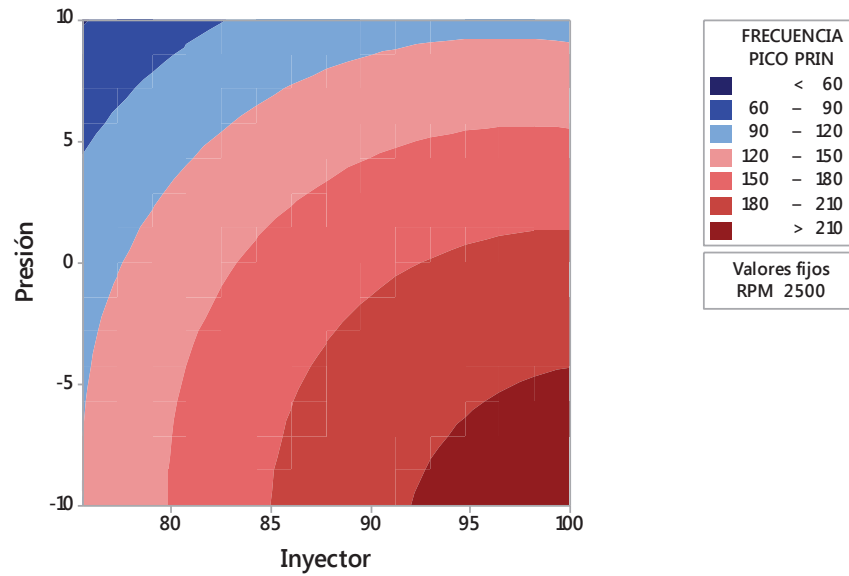


Figura 3.152. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. Inyector.²³³

En la figura 3.153 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico versus régimen de giro y la presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el estado físico del inyector a 87,8 %, que es donde se da la mayor variación del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico, además en la figura 3.154 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

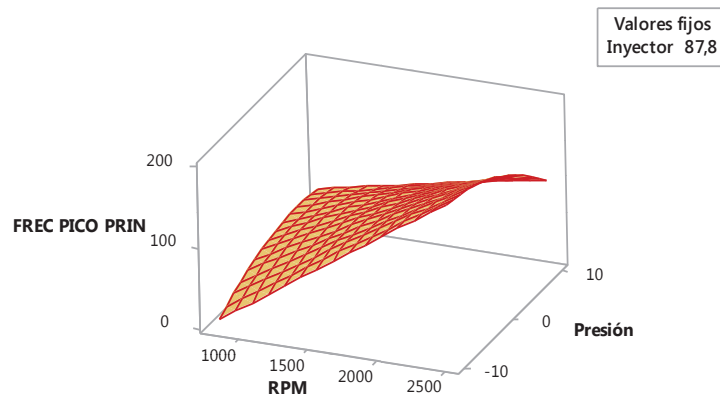


Figura 3.153. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. RPM.²³⁴

²³³ Fuente: Los autores.

²³⁴ Fuente: Los autores.

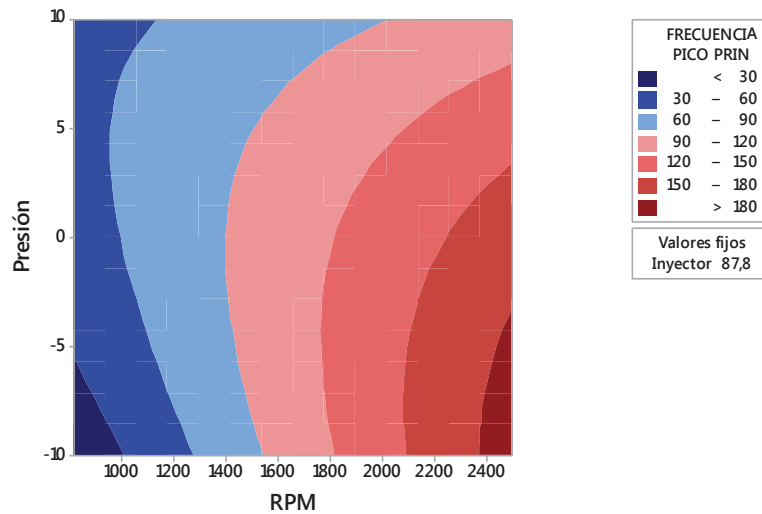


Figura 3.154. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico vs. Presión. RPM.²³⁵

3.4.4.16 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico

En la figura 3.155 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el estado físico del inyector es el factor que más influye en este valor de frecuencia, seguido del régimen de giro y de la presión de inyección en el riel.

En la figura 3.156 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector así como la interacción entre la presión de inyección en el riel y el régimen de giro ya que las líneas no son paralelas y existen cruces definidos.

²³⁵ Fuente: Los autores.

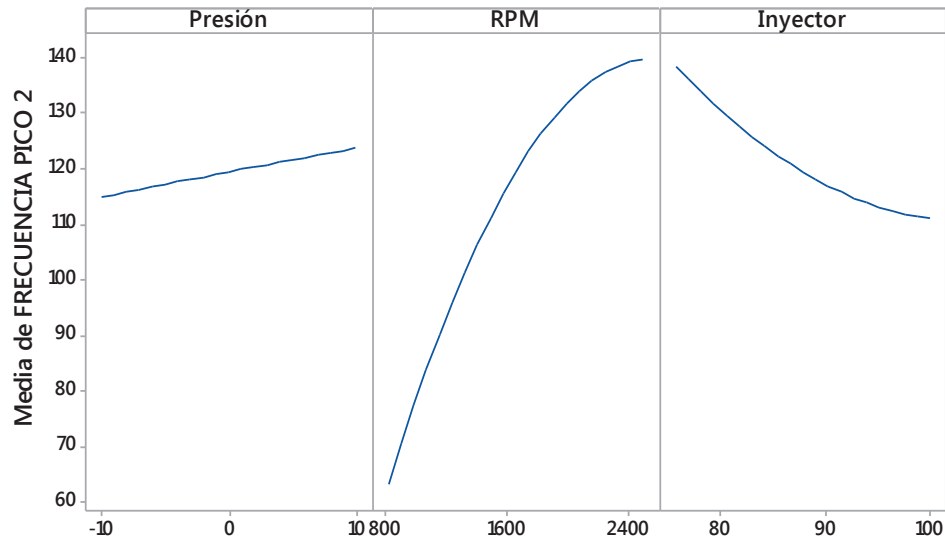


Figura 3.155. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.²³⁶

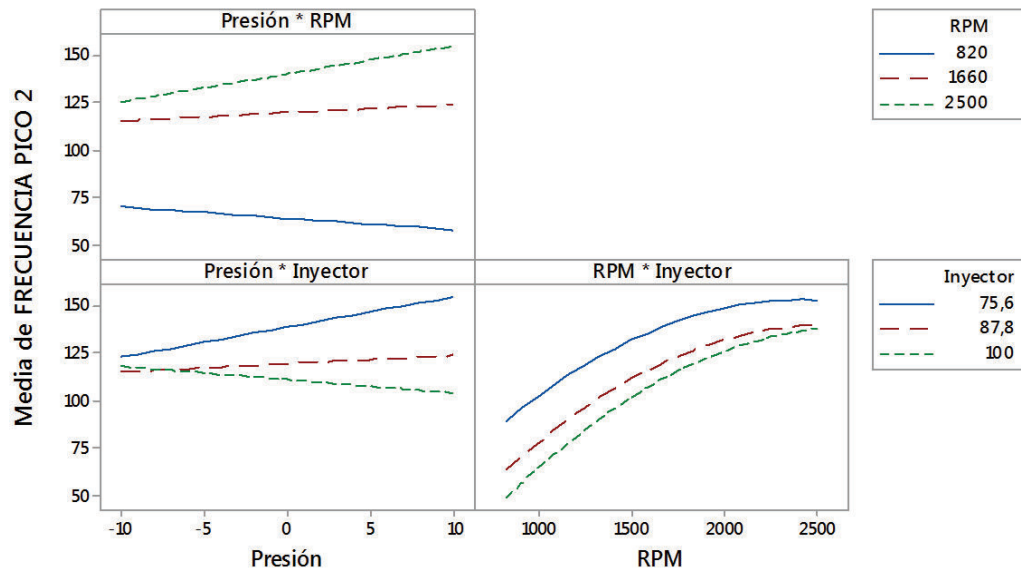


Figura 3.156. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico.²³⁷

²³⁶ Fuente: Los autores.

²³⁷ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.16) que establece el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 70,67 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FRECUENCIA PICO 2} = & 441 + 6,61 \text{ Presión} + 0,076 \text{ RPM} - 8,5 \text{ Inyector} \\ & - 0,001 \text{ Presión}^2 - 0,000025 \text{ RPM}^2 + 0,0360 \text{ Inyector}^2 + 0,00124 \text{ Presión} * \text{RPM} \\ & - 0,0937 \text{ Presión} * \text{Inyector} + 0,00061 \text{ RPM} * \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.16)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.157, que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico versus el régimen de giro y la presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el estado físico del inyector en 75,6 %, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.158 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

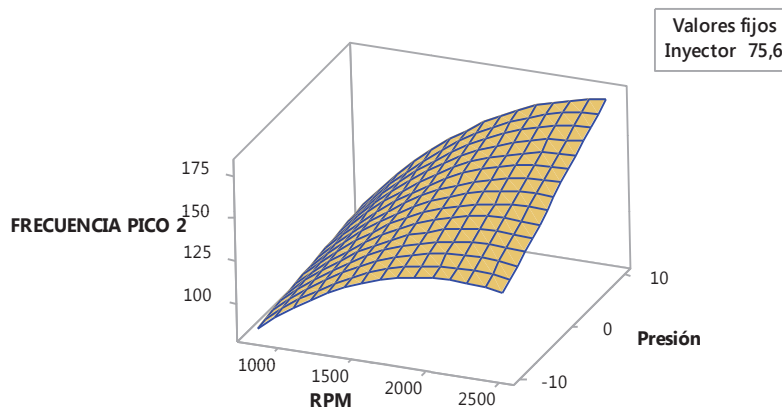


Figura 3.157. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. RPM.²³⁸

²³⁸ Fuente: Los autores.

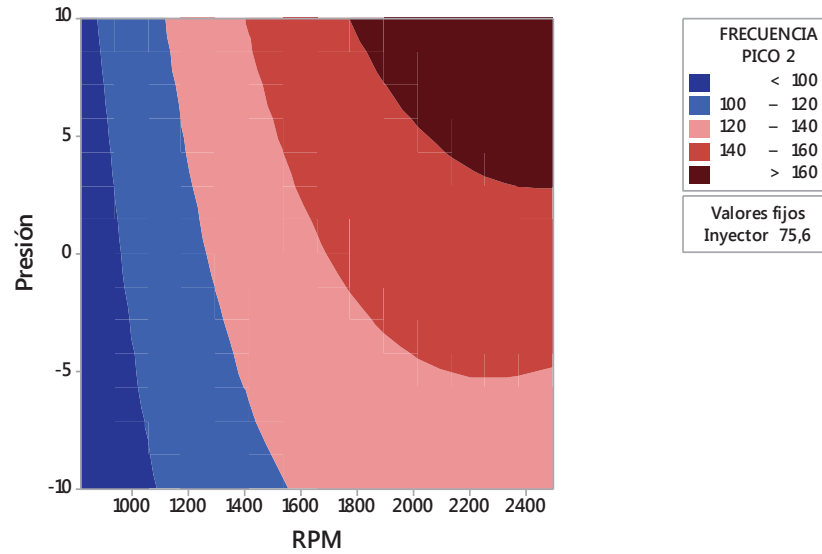


Figura 3.158. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. RPM.²³⁹

En la figura 3.159 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico versus el estado físico del inyector y la presión de inyección en el riel, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.160 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

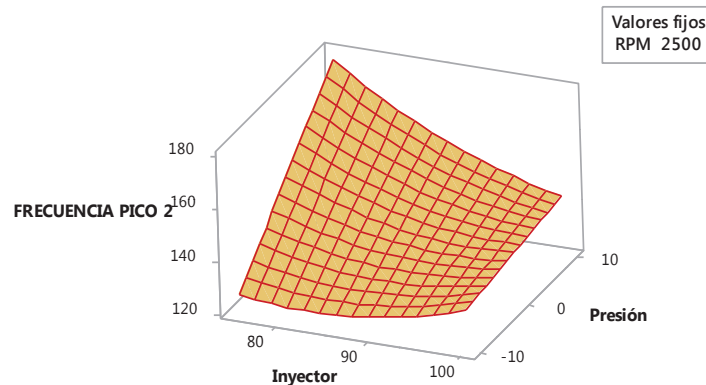


Figura 3.159. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. Inyector.²⁴⁰

²³⁹ Fuente: Los autores.

²⁴⁰ Fuente: Los autores.

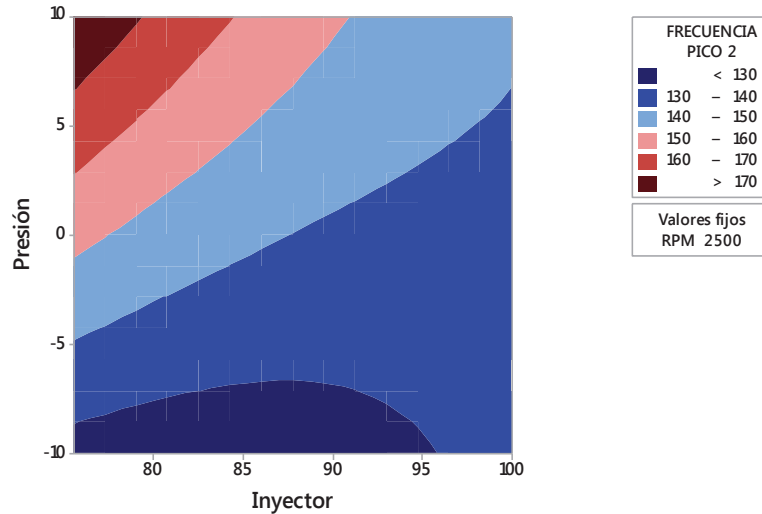


Figura 3.160. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico vs. Presión. Inyector.²⁴¹

3.4.4.17 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico

En la figura 3.161 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en este valor de frecuencia, seguido de la presión de inyección en el riel y del estado físico del inyector.

En la figura 3.162 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector seguida de la interacción entre la presión de inyección en el riel con el régimen de giro, debido a tener cruces de líneas definidos.

²⁴¹ Fuente: Los autores.

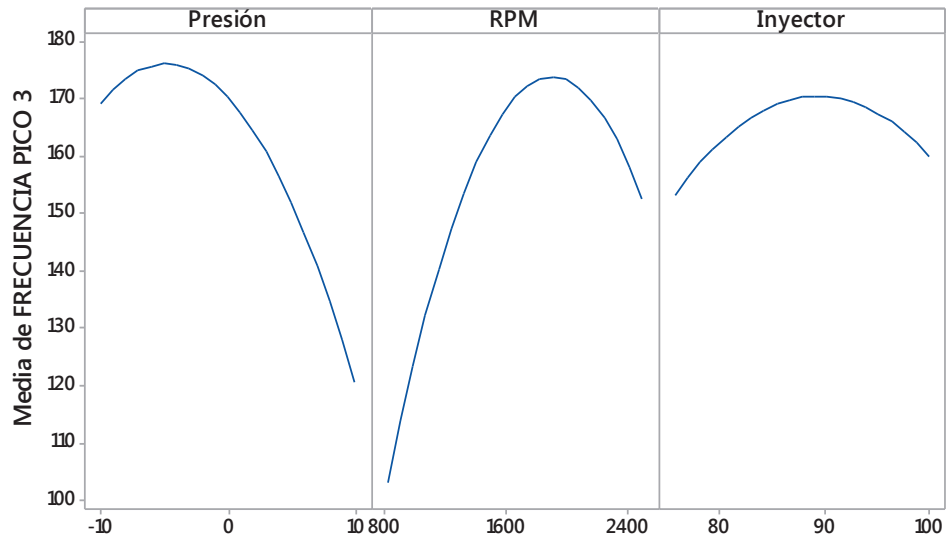


Figura 3.161. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.²⁴²

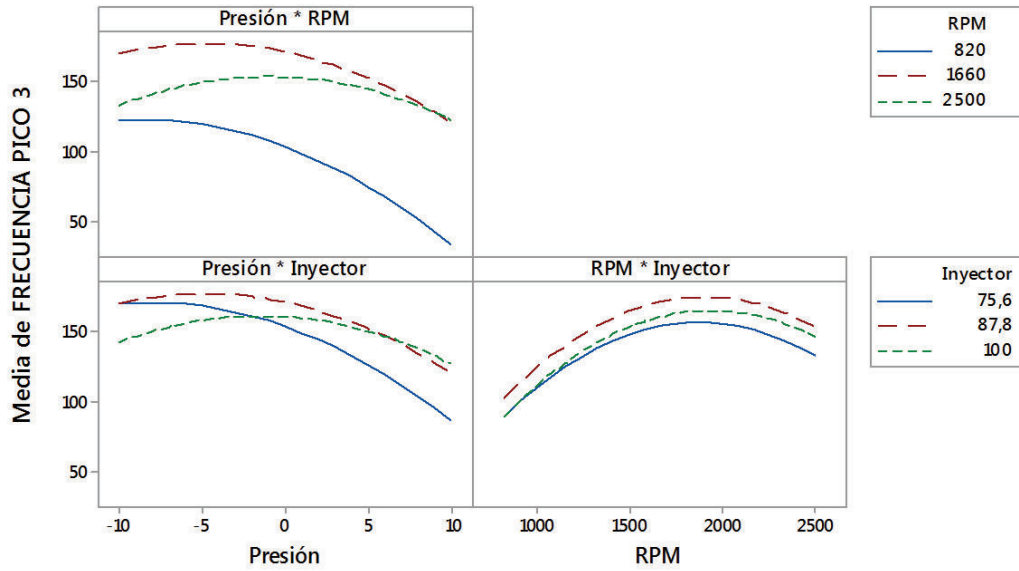


Figura 3.162. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico.²⁴³

²⁴² Fuente: Los autores.

²⁴³ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.17) que establece el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 70,05 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FRECUENCIA PICO } 3 = & -726 - 18,28 \text{ Presión} + 0,200 \text{ RPM} + 15,8 \text{ Inyector} \\ & - 0,254 \text{ Presión}^2 - 0,000060 \text{ RPM}^2 - 0,0915 \text{ Inyector}^2 + 0,00229 \text{ Presión} * \text{RPM} \\ & + 0,137 \text{ Presión} * \text{Inyector} + 0,00033 \text{ RPM} * \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.17)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.163, que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico versus presión de inyección en el riel y estado físico del inyector, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2000 rpm, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.164 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

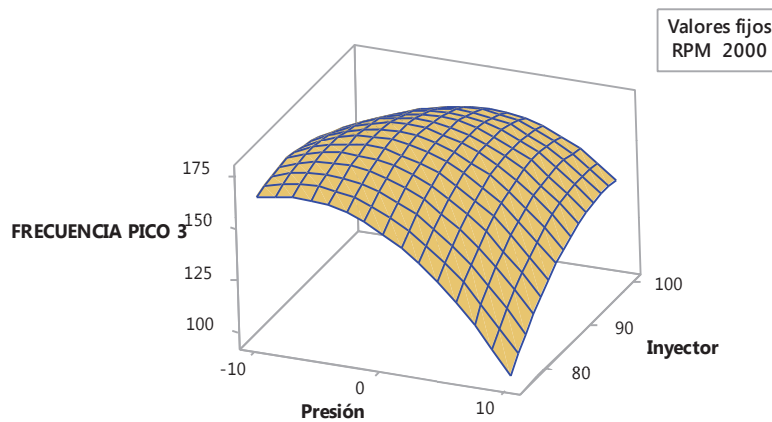


Figura 3.163. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. Presión.²⁴⁴

²⁴⁴ Fuente: Los autores.

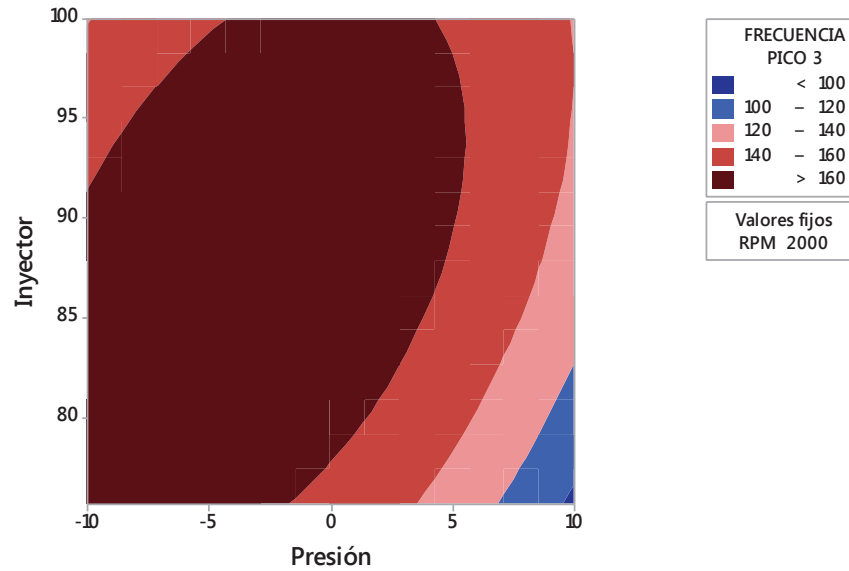


Figura 3.164. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. Presión.²⁴⁵

En la figura 3.165 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico versus el régimen de giro y el estado físico del inyector, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel 0, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.166 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

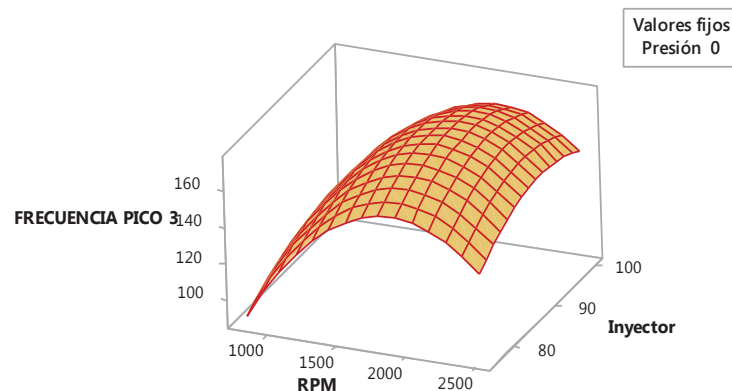


Figura 3.165. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. RPM.²⁴⁶

²⁴⁵ Fuente: Los autores.

²⁴⁶ Fuente: Los autores.

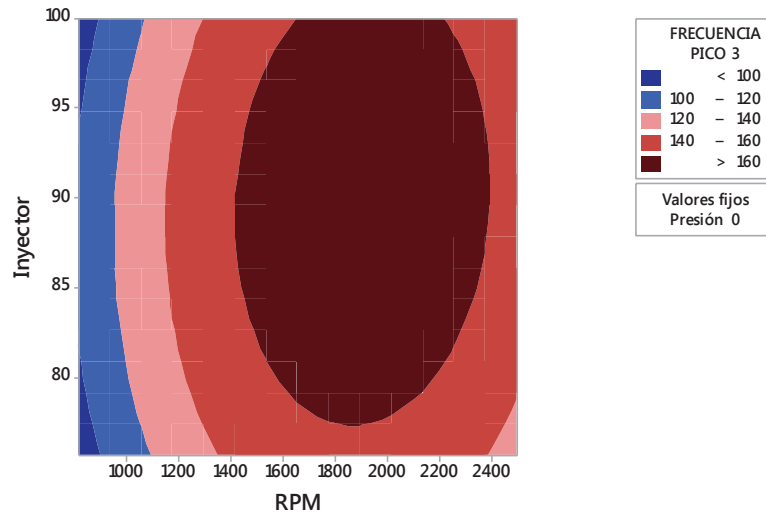


Figura 3.166. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico vs. Inyector. RPM.²⁴⁷

3.4.4.18 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico

En la figura 3.167 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el régimen de giro es el factor que más influye en este valor de frecuencia, seguido de la presión de inyección en el riel y del estado físico del inyector.

En la figura 3.168 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector seguida de la interacción entre la presión de inyección en el riel con el régimen de giro, debido a tener cruces de líneas definidos.

²⁴⁷ Fuente: Los autores.

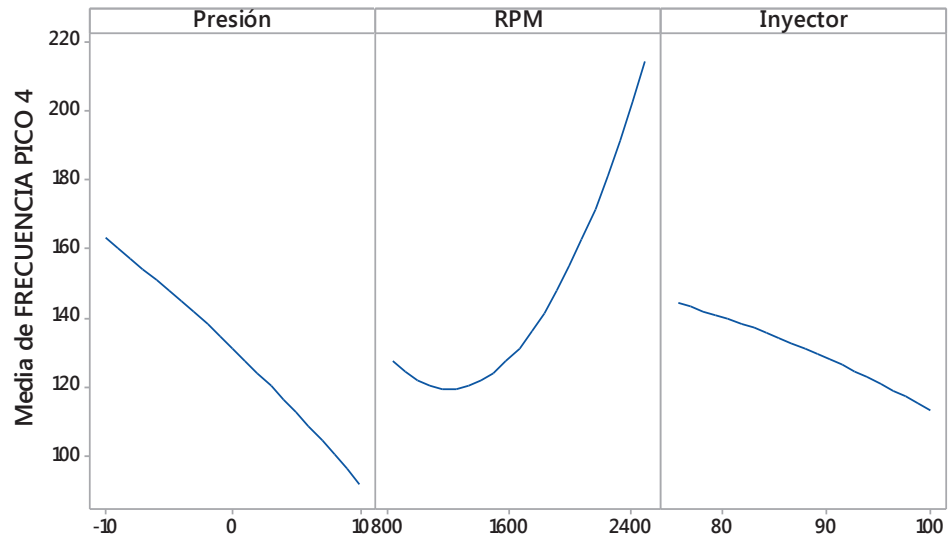


Figura 3.167. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.²⁴⁸

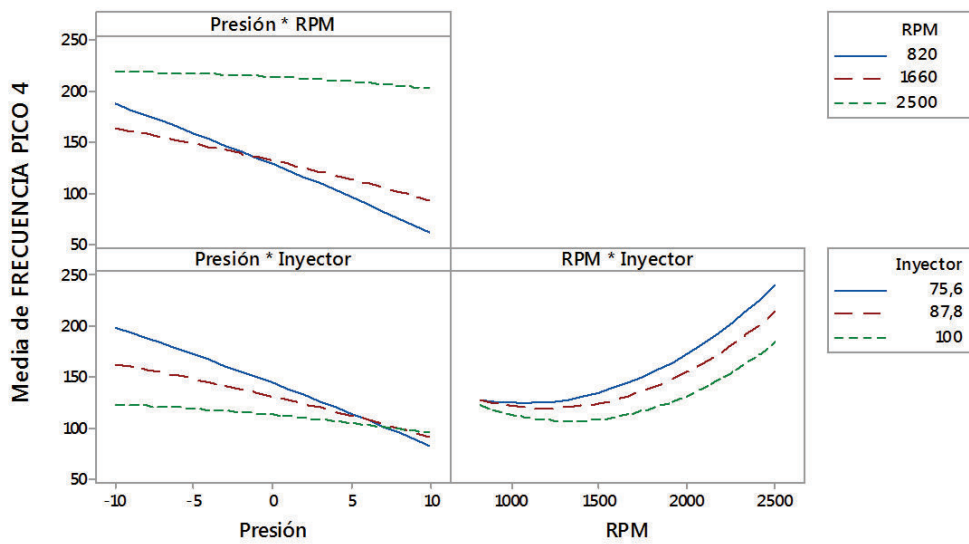


Figura 3.168. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico.²⁴⁹

²⁴⁸ Fuente: Los autores.

²⁴⁹ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.18) que establece el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 71,08 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FRECUENCIA PICO 4} = & 8 - 24,7 \text{ Presión} - 0,031 \text{ RPM} + 3,7 \text{ Inyector} \\ & - 0,037 \text{ Presión}^2 + 0,000056 \text{ RPM}^2 - 0,017 \text{ Inyector}^2 + 0,00328 \text{ Presión} * \text{RPM} \\ & + 0,179 \text{ Presión} * \text{Inyector} - 0,00119 \text{ RPM} * \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.18)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.169, que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico versus presión de inyección en el riel y estado físico del inyector, tomando como valor fijo el régimen de giro a 2500 rpm, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.170 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

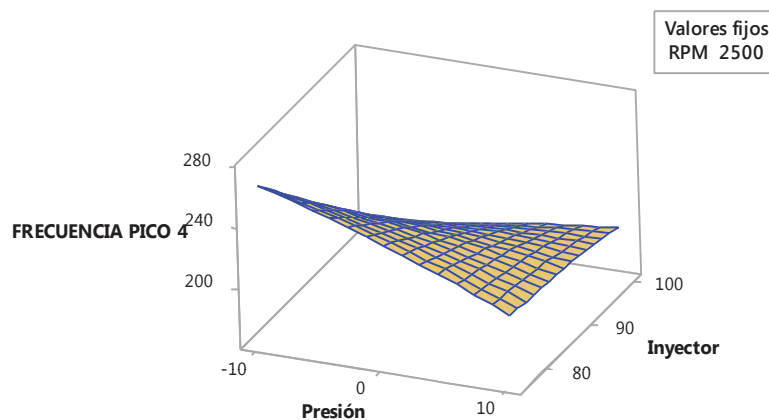


Figura 3.169. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. Presión.²⁵⁰

²⁵⁰ Fuente: Los autores.

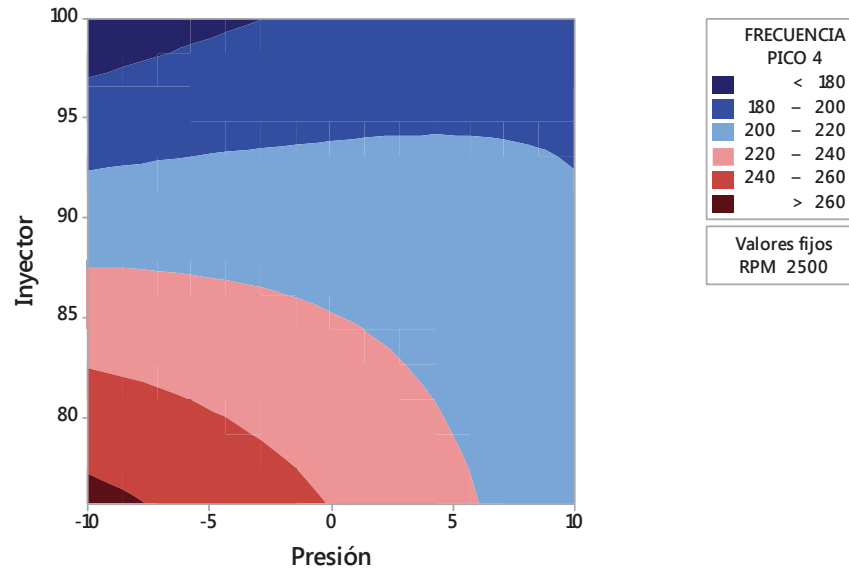


Figura 3.170. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. Presión.²⁵¹

En la figura 3.171 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico versus el régimen de giro y el estado físico del inyector, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel -10, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.172 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

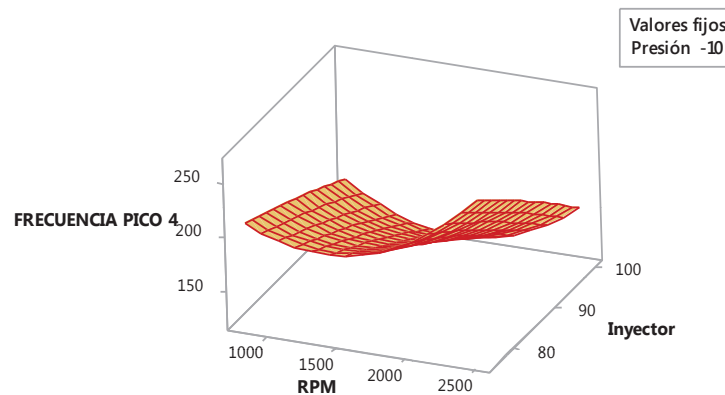


Figura 3.171. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. RPM.²⁵²

²⁵¹ Fuente: Los autores.

²⁵² Fuente: Los autores.

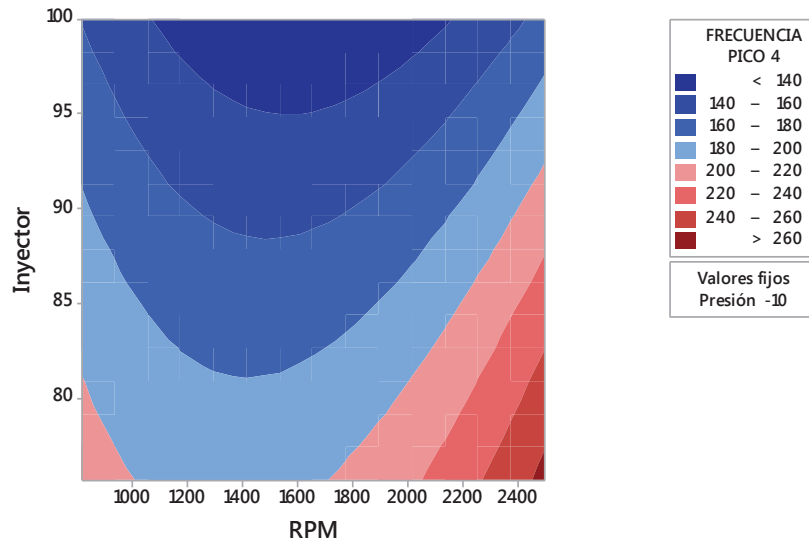


Figura 3.172. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico vs. Inyector. RPM.²⁵³

3.4.4.19 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico

En la figura 3.173 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que el estado físico del inyector y la presión de inyección en el riel, son los factores más influyentes en este valor de frecuencia, seguidos del régimen de giro.

En la figura 3.174 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte en las tres gráficas, ya que existen cruces definidos en las mismas.

²⁵³ Fuente: Los autores.

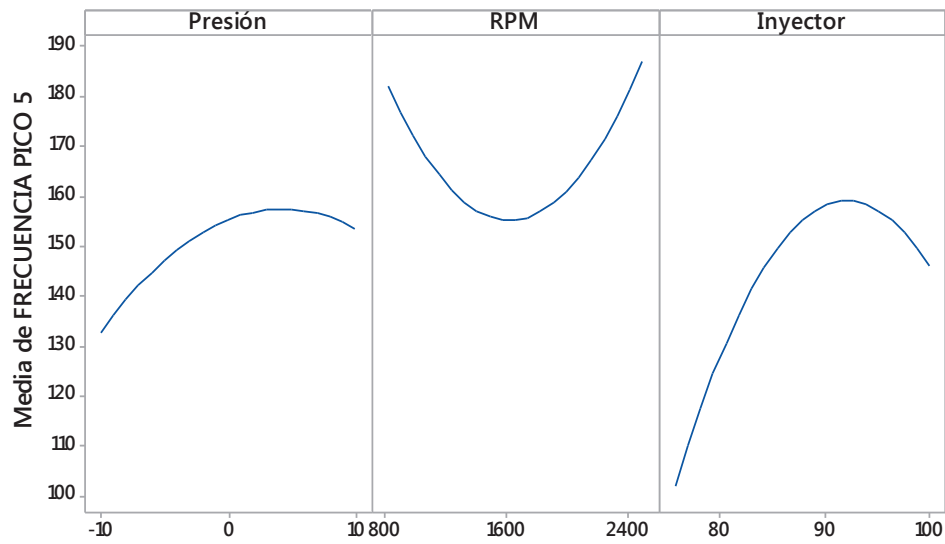


Figura 3.173. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.²⁵⁴

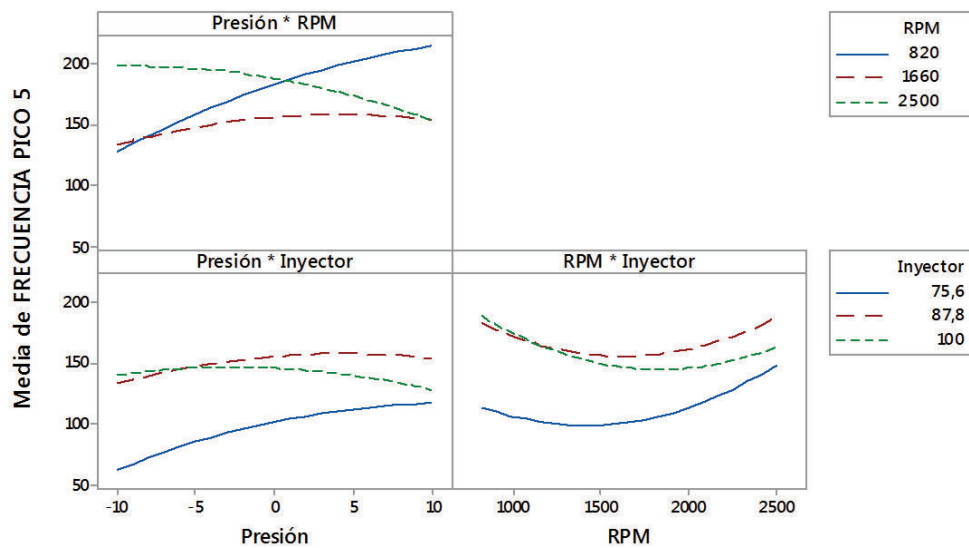


Figura 3.174. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.²⁵⁵

²⁵⁴ Fuente: Los autores.

²⁵⁵ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.19) que establece el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 71,13 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FRECUENCIA PICO 5} = & -1731 + 19,6 \text{ Presión} - 0,008 \text{ RPM} + 41,3 \text{ Inyector} \\ & - 0,120 \text{ Presión}^2 + 0,000042 \text{ RPM}^2 - 0,211 \text{ Inyector}^2 - 0,00390 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \\ & - 0,137 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} - 0,00145 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.19)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.175, que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico versus presión de inyección en el riel y régimen de giro, tomando como valor fijo el estado físico del inyector a 87,8 %, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.176 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

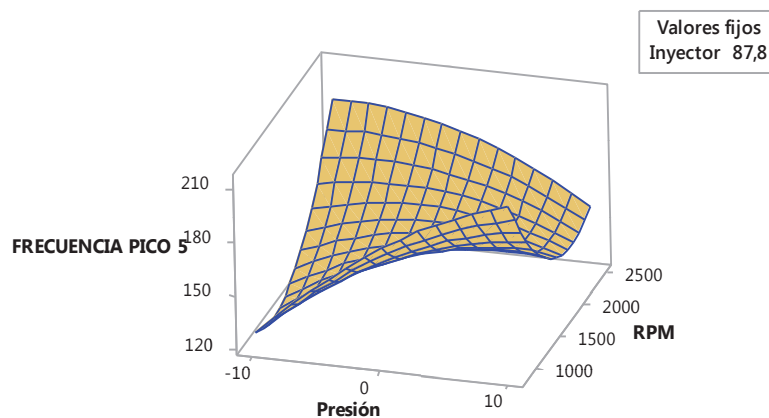


Figura 3.175. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Presión.²⁵⁶

²⁵⁶ Fuente: Los autores.

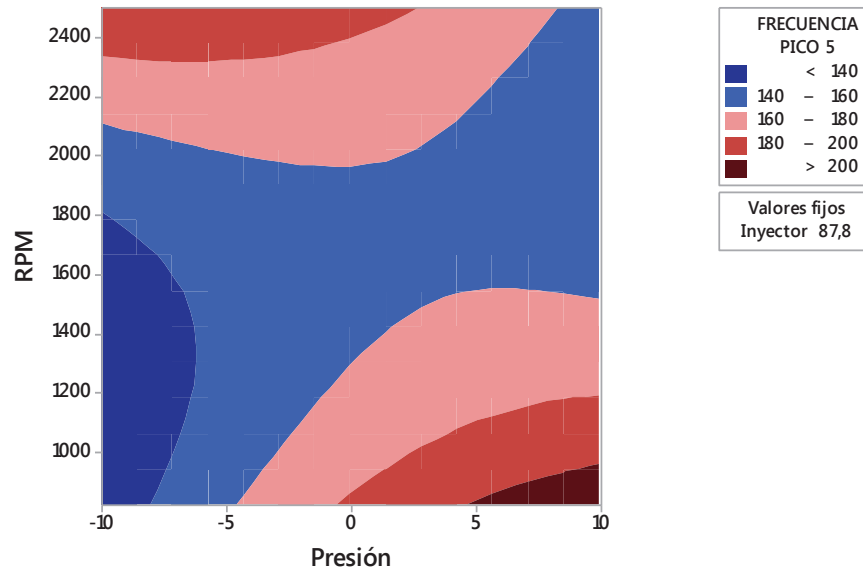


Figura 3.176. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Presión.²⁵⁷

En la figura 3.177 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico versus el estado físico del inyector y el régimen de giro, tomando como valor fijo la presión de inyección en el riel 10, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.178 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

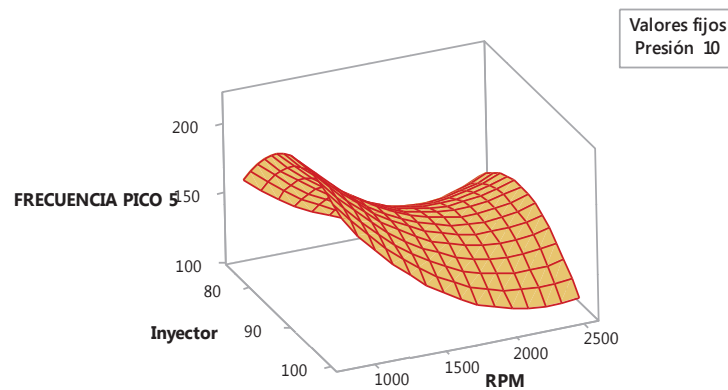


Figura 3.177. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Inyector.²⁵⁸

²⁵⁷ Fuente: Los autores.

²⁵⁸ Fuente: Los autores.

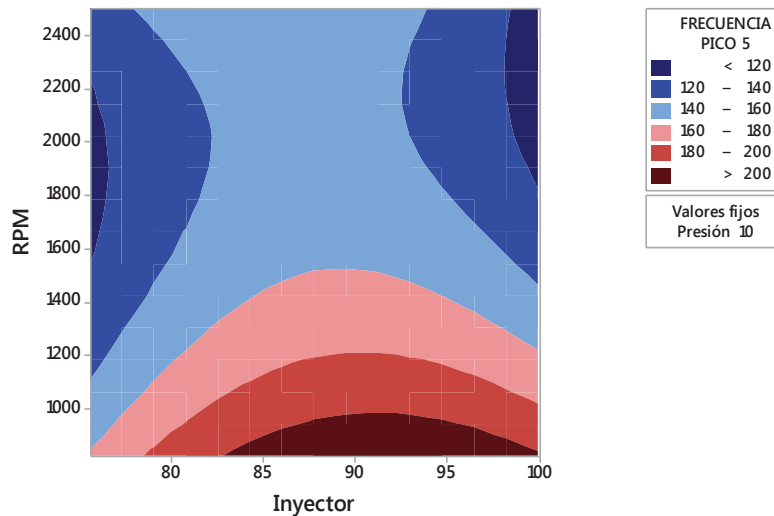


Figura 3.178. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico vs. RPM. Inyector.²⁵⁹

3.4.4.20 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico

En la figura 3.179 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que los tres factores son muy influyentes en este valor de frecuencia, siendo la presión de inyección en el riel el factor que más influye seguido del régimen de giro y del estado físico del inyector.

En la figura 3.180 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector, mientras que la interacción entre el régimen de giro y el estado físico del inyector es una interacción más débil.

²⁵⁹ Fuente: Los autores.

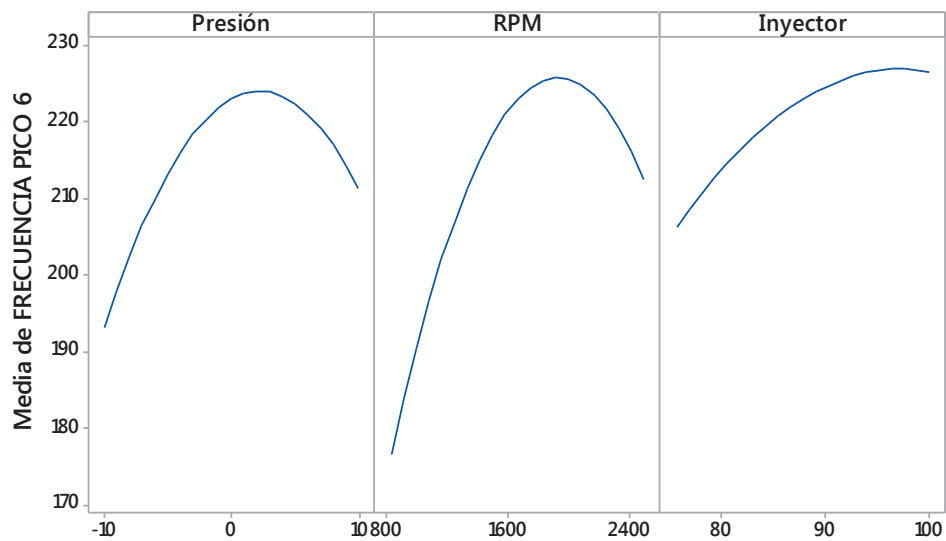


Figura 3.179. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.²⁶⁰

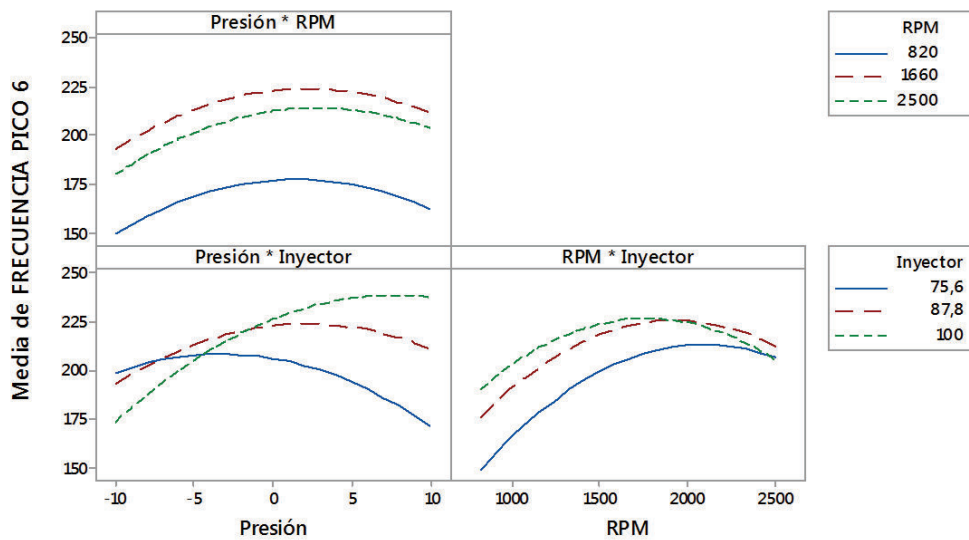


Figura 3.180. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico.²⁶¹

²⁶⁰ Fuente: Los autores.

²⁶¹ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.20) que establece el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 72,2 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FRECUENCIA PICO } 6 = & -491 - 15,9 \text{ Presión} + 0,247 \text{ RPM} + 10,4 \text{ Inyector} \\ & - 0,208 \text{ Presión}^2 - 0,000040 \text{ RPM}^2 - 0,044 \text{ Inyector}^2 + 0,00031 \text{ Presión} * \text{RPM} \\ & + 0,186 \text{ Presión} * \text{Inyector} - 0,00105 \text{ RPM} * \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.20)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.181, que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico versus régimen de giro y estado físico del inyector, tomando como valor fijo presión de inyección en el riel 0, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.182 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

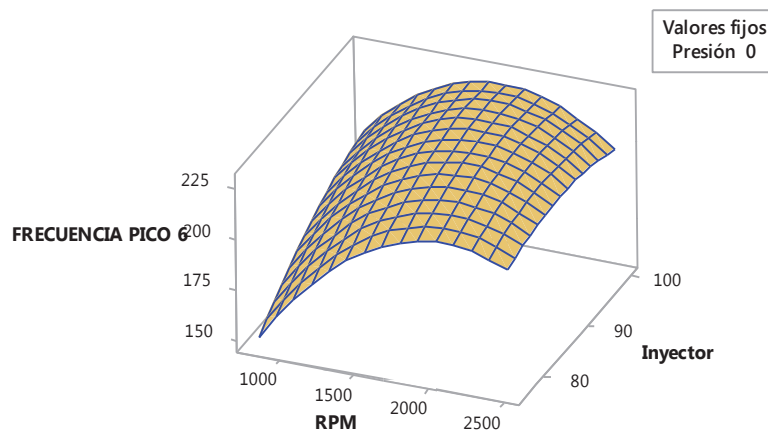


Figura 3.181. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. RPM.²⁶²

²⁶² Fuente: Los autores.

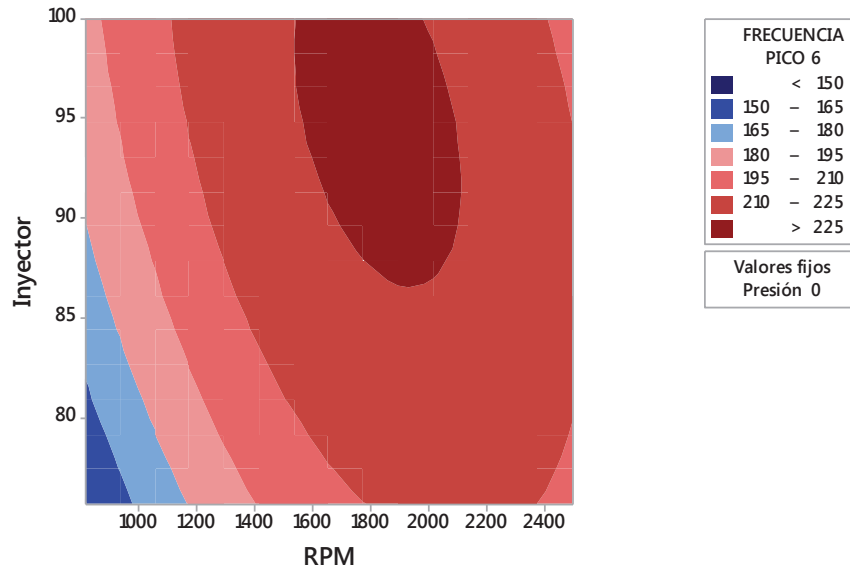


Figura 3.182. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. RPM.²⁶³

En la figura 3.183 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico versus presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector, tomando como valor fijo el régimen de giro 2000 rpm, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.184 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

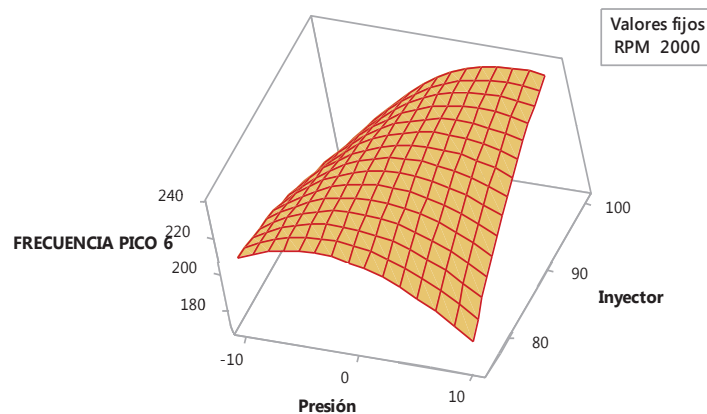


Figura 3.183. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. Presión.²⁶⁴

²⁶³ Fuente: Los autores.

²⁶⁴ Fuente: Los autores.

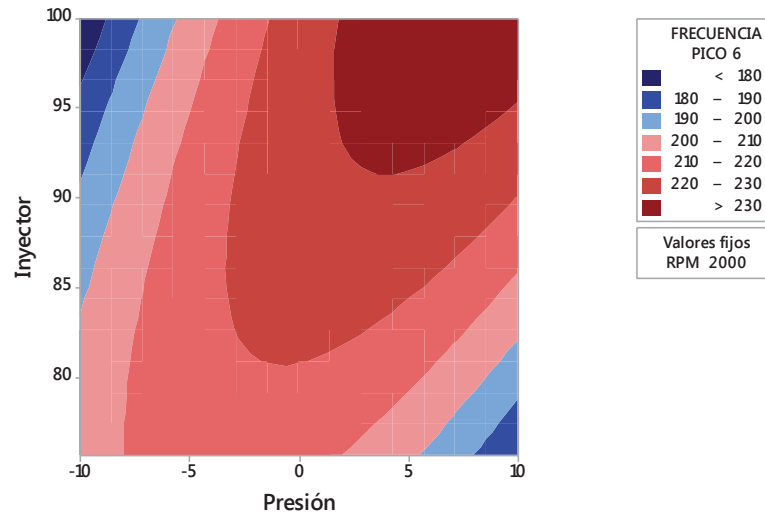


Figura 3.184. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico vs. Inyector. Presión.²⁶⁵

3.4.4.21 Análisis de diagramas del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico

En la figura 3.185 se presenta la gráfica de efectos principales que muestra el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico respecto a los factores considerados, donde se corrobora lo descrito en el diagrama de Pareto de los efectos, al observar esta gráfica de efectos se aprecia que la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector son los factores más influyentes en este valor de frecuencia, seguidos del régimen de giro.

En la figura 3.186 se muestra la gráfica de interacción, donde se observa una interacción fuerte entre la presión de inyección en el riel y el régimen de giro así como también entre la presión de inyección en el riel y el estado físico del inyector, al tener cruces de líneas bien definidos.

²⁶⁵ Fuente: Los autores.

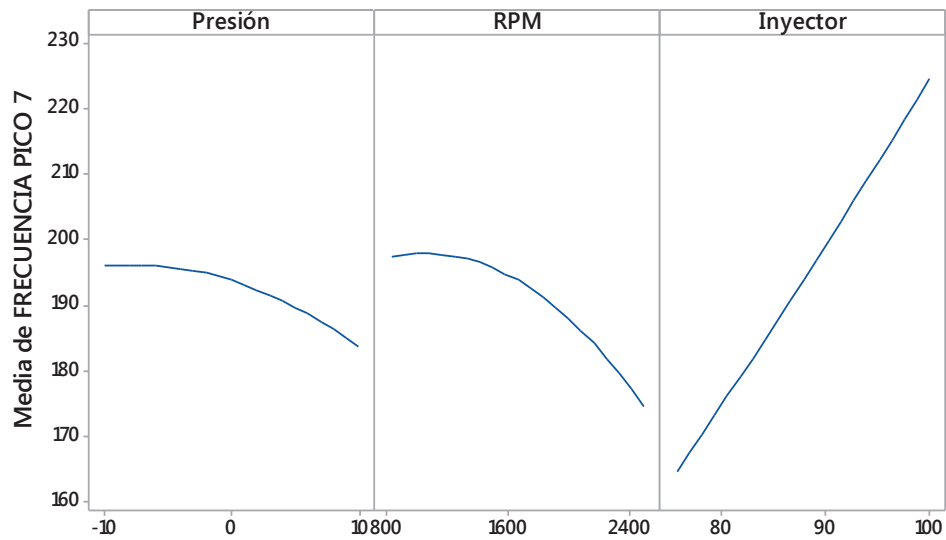


Figura 3.185. Gráfica de efectos principales para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.²⁶⁶

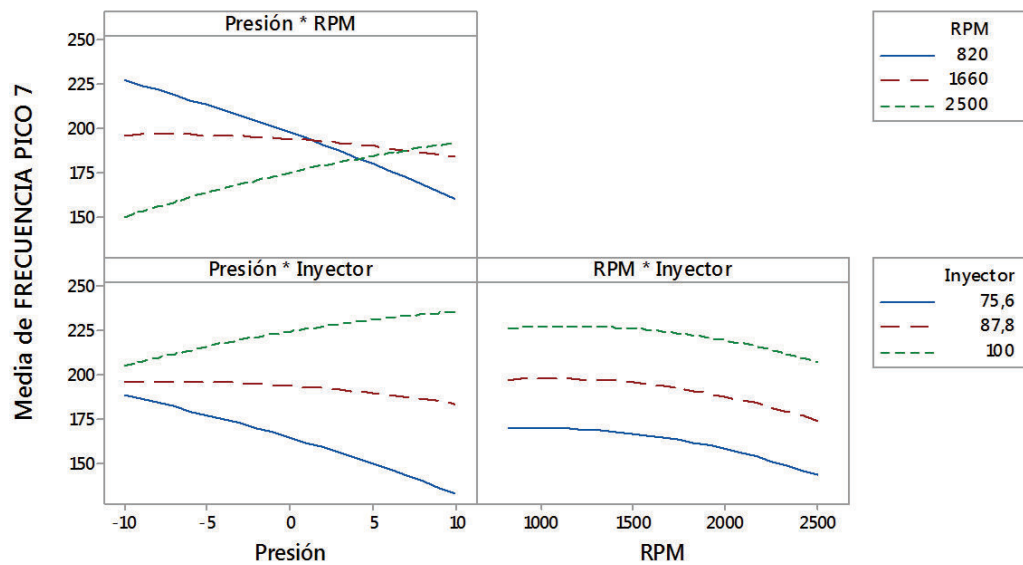


Figura 3.186. Gráfica de interacción para el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico.²⁶⁷

²⁶⁶ Fuente: Los autores.

²⁶⁷ Fuente: Los autores.

Por medio del programa estadístico Minitab®, se obtiene una regresión que da como resultado una ecuación (3.21) que establece el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico en función de los tres factores usados para el análisis con un coeficiente de correlación $R^2 = 71,49 \%$.

$$\begin{aligned} \text{FRECUENCIA PICO } 7 = & 39 - 21,3 \text{ Presión} + 0,008 \text{ RPM} + 1,2 \text{ Inyector} \\ & - 0,039 \text{ Presión}^2 - 0,000011 \text{ RPM}^2 + 0,006 \text{ Inyector}^2 + 0,00322 \text{ Presión} \cdot \text{RPM} \\ & + 0,175 \text{ Presión} \cdot \text{Inyector} + 0,00018 \text{ RPM} \cdot \text{Inyector} \end{aligned} \quad (3.21)$$

De lo establecido anteriormente se obtiene la gráfica de superficie en la figura 3.187, que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico versus estado físico del inyector y régimen de giro, tomando como valor fijo presión de inyección en el riel -10, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.188 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

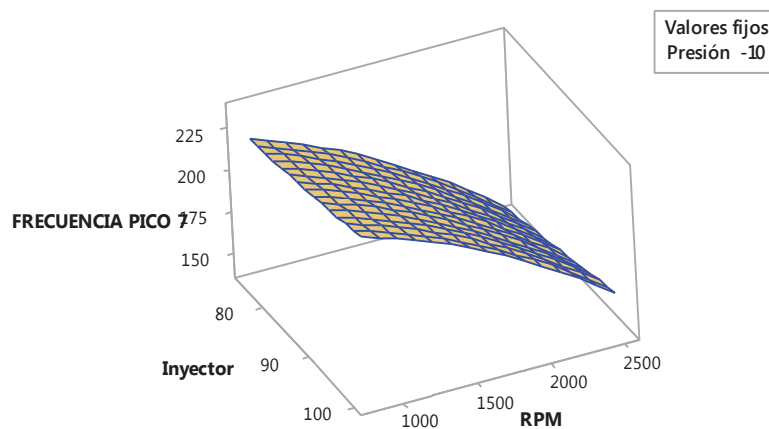


Figura 3.187. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Inyector.²⁶⁸

²⁶⁸ Fuente: Los autores.

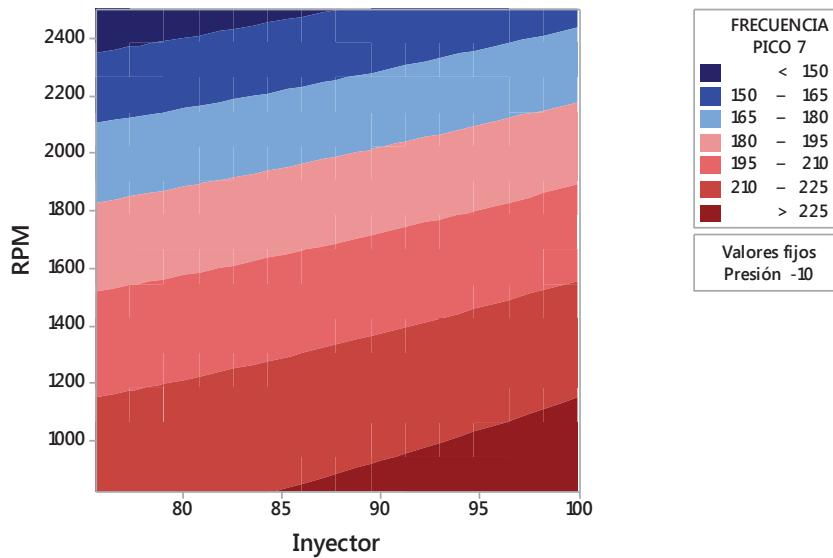


Figura 3.188. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Inyector.²⁶⁹

En la figura 3.189 se presenta además la gráfica de superficie que representa el comportamiento del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico versus la presión de inyección en el riel y el régimen de giro, tomando como valor fijo el estado físico del inyector en 100 %, que es donde se da la mayor variación de este valor de frecuencia, además en la figura 3.190 se presenta su respectiva gráfica de contorno para una mejor interpretación de los resultados.

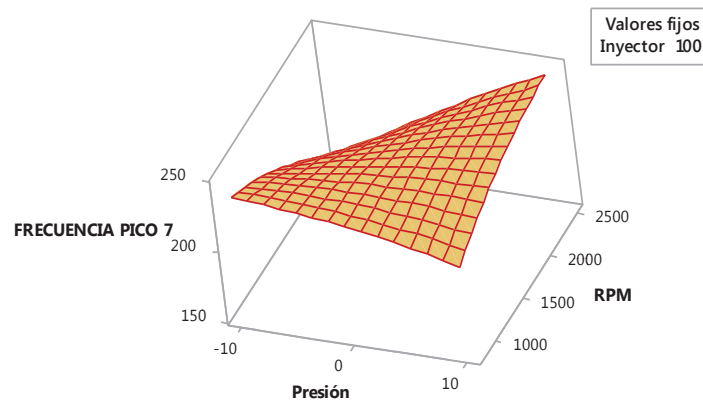


Figura 3.189. Gráfica de superficie del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Presión.²⁷⁰

²⁶⁹ Fuente: Los autores.

²⁷⁰ Fuente: Los autores.

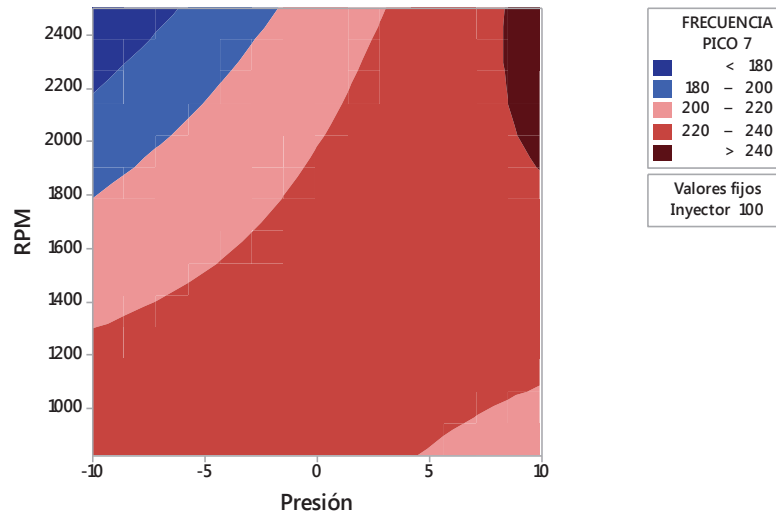


Figura 3.190. Gráfica de contorno del valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico vs. RPM. Presión.²⁷¹

²⁷¹ Fuente: Los autores.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO

4.1 CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas sobre el motor CRDI Hyundai, modelo Santa Fe 2.0, en función de la variación de los factores establecidos, como los más influyentes en la variación de volumen de combustible y de su posterior tratamiento, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Del conjunto de variables de respuesta que se obtuvieron después de procesar las señales, se puede concluir que la media es una variable de respuesta que por su bajo valor en las 45 pruebas realizadas, no resulta ser una variable relevante para este tipo de análisis.
- Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales cumplieron con los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia del modelo, brindando así confianza en la validez de los valores obtenidos para cada variable de respuesta, en las distintas pruebas realizadas.
- Al tomar en cuenta la comparación entre el espectro patrón para el régimen de giro de 820 rpm, con los tres espectros de falla, se puede observar que para los tres casos no existe un desfase entre los armónicos de estos espectros, pero la amplitud de los armónicos presenta una variación de su magnitud de acuerdo al tipo de fallo, así pues para la prueba experimental con fallo en el motor sin variación de presión en el riel a 820 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 75,6%, la amplitud del armónico X/2 se incrementa en un 80,6 % con respecto al del espectro patrón, mientras que el resto de armónicos disminuyen su amplitud

progresivamente con respecto a la del espectro patrón, presentándose esto como una característica propia para el fallo en análisis, es decir que cada fallo en estudio para el régimen de giro de 820 rpm, tiene características definidas con respecto a la variación de las amplitudes de los armónicos.

- Comparando el espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm y el espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm, con los respectivos espectros de falla correspondientes, se puede observar que para todos los casos existe un desfase entre los armónicos de estos espectros y además se tiene la presencia de sub armónicos, por lo que se concluye que la variación de volumen de combustible en los inyectores del motor, sea esta por la variación de presión en el riel o por el estado físico del inyector, genera inestabilidad en el motor con respecto al régimen de giro, dando lugar a las características mencionadas.

- Al comparar el espectro patrón para el régimen de giro de 1660 rpm con los cinco espectros de falla correspondientes, se puede observar que la amplitud de los armónicos sufre una variación de su magnitud de acuerdo al tipo de fallo, así pues para la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 1660 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 100 %, la amplitud de los armónicos $X/2$ y $2X$ se incrementan, el primero 9,38 veces y el segundo 18,08 veces con respecto a la amplitud del espectro patrón, mientras que el resto de armónicos presentan una disminución de su amplitud, esto determina las características propias para este tipo de fallo en análisis.

- Al contrastar las diferencias del espectro patrón para el régimen de giro de 2500 rpm con los tres espectros de falla correspondientes, se observa que la amplitud de los armónicos sufre una variación de su magnitud de acuerdo al tipo de fallo, así pues para la prueba experimental con fallo en el motor con variación de presión en el riel de menos 10 bar a 2500 rpm y con un inyector que posee un porcentaje de volumen de inyección del 87,8 %, la amplitud del armónico $X/2$ se incrementa en un 191,9 %, el armónico X en

cambio se incrementa en un 180,1 % y el armónico 4X se incrementa en un 69,8 % con respecto a la amplitud del espectro patrón, mientras que el armónico 2X disminuye en un 17,8 % y el armónico 6X disminuye en un 95,9% con respecto a la amplitud del espectro patrón, esto determina las características propias para este tipo de fallo en análisis.

- Al considerar el análisis realizado en los diagramas de Pareto de los efectos de los factores sobre las variables de respuesta, se concluye que el factor de mayor influencia sobre las mismas, es el régimen de giro del motor, siguiéndole en importancia la presión de inyección en el riel, y la combinación de estas dos. Esto coincide con los resultados obtenidos, pues al aumentar el valor del régimen de giro del motor en las pruebas, los espectros de fallo muestran una mayor variación en sus características.
- Se establece que al analizar los diagramas de Pareto de los efectos de los factores sobre las variables de respuesta, que el estado físico del inyector es el de menor influencia en las variables de respuesta obtenidas en las pruebas experimentales.
- Se concluye con el análisis de los resultados obtenidos y los diagramas de Pareto de los efectos, que las variables de respuesta más sensibles al factor de presión de inyección en el riel son: la potencia, la moda, el valor de RMS, la media, la varianza, la desviación estándar, el valor máximo, el valor mínimo, la potencia en el intervalo de frecuencia, la energía y el valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico, mientras que las variables de respuesta más sensibles al factor de estado físico del inyector son: la asimetría, curtosis, la mediana, el valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico y el valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico.
- Con los diagramas de efectos principales, de interacción de factores y gráficas de superficie y contorno, se corrobora los resultados obtenidos en el análisis de diagramas de Pareto de los efectos de los factores sobre las variables de respuesta, se puede considerar el caso del análisis de

diagramas de potencia, el mismo en el que se define que el régimen de giro es el factor que más influye en la potencia, seguido de la presión de inyección en el riel y con una baja influencia del estado físico del inyector.

4.2 RECOMENDACIONES

En este punto se dan a conocer recomendaciones basadas en el proyecto investigativo desarrollado, las cuales se enuncian a continuación.

- Se recomienda establecer un adecuado diseño experimental para poder generar resultados valederos sobre el sistema en análisis, empleando pruebas planeadas de una forma adecuada.
- La adquisición de datos es el primer y principal paso a dar para hacer un análisis de vibraciones, por lo que se recomienda establecer de forma adecuada las variables controlables y no controlables a considerar, así como también los factores y variables de respuesta necesarios para el desarrollo de las pruebas experimentales.
- Para el desarrollo de las pruebas experimentales siempre se debe respetar el protocolo establecido, con el objetivo de garantizar la repetitividad y la reproducibilidad de las mismas.
- Se debe considerar la normativa vigente relacionada con el análisis de vibraciones, con el fin de establecer parámetros claros para el desarrollo de adquisición de datos y en consecuencia obtener resultados adecuados.
- Con el fin de detectar fallas complementarias, se recomienda ampliar el rango del régimen de giro del motor.

- Debido a que el estado físico del inyector no fue un factor estadísticamente significativo sobre las variables de respuesta, se recomienda utilizar inyectores con fallos más severos.
- Se recomienda socializar los resultados obtenidos en este proyecto investigativo, a través de los distintos medios relacionados con la academia.

4.3 TRABAJOS A FUTURO

En este punto se establecen posibles trabajos a futuro relacionados directamente con el presente proyecto investigativo, los mismos se describen a continuación.

- Estudio económico de la implementación del presente proyecto de investigación.
- Establecer un diagnóstico de fallas ocasionadas por diferentes factores en un motor de combustión interna alternativo a diésel mediante el análisis de ruido.
- Realizar el estudio de diagnóstico de fallas ocasionadas por diferentes factores en un motor de combustión interna alternativo a gasolina mediante el análisis de vibraciones mecánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS

- Alonso, J. M. 2000. Técnicas del Automóvil. Décima Edición. España. Paraninfo.
- Alonso, J. M. 2001. Técnicas del Automóvil, Sistemas de Inyección de combustible en los motores diésel. España. Paraninfo.
- Díaz Navarro, J. 2004. Técnicas de Mantenimiento Industrial. Escuela Politécnica Superior-Algeciras. Universidad de Cádiz. España.
- Gutiérrez Pulido, H. & De La Vara Salazar, R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. Segunda Edición. México. McGraw-Hill.
- Marín, E. P. 2007. Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias. Quinta Edición. Cuba.
- Martínez, H. 2009. Enciclopedia Práctica del Automóvil, Reparación y Mantenimiento. España. Cultural S.A.
- Montgomery, D. C. 2013. Design and analysis of experiments. Eighth edition. United States. John Wiley & Sons, Inc.
- Mosquera, G. 2001. Las Vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo. Centro de Altos Estudios Gerenciales – Instituto Superior de Investigación y Desarrollo. Caracas. Venezuela.
- Sánchez, E. Sistemas Auxiliares del Motor. Macmillan Profesional.
- Soliman, S. & Srinath, M. 1999. Señales y Sistemas Continuos y Discretos. Segunda Edición. España. Prentice Hall.
- White, G. 2010. Introducción al Análisis de Vibraciones. USA.

NORMAS

- International Standard. (1995, Diciembre 15). ISO 10816-6, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 202:2000; 2000; Gestión ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores de diésel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre; Primera edición; Quito; Ecuador.

PÁGINAS WEB

- http://www.inyecciondiesel.cl/web/documentos/Sistemas_de_Inyecci%C3%B3n_Diesel.pdf
- http://www.inyecciondiesel.cl/web/documentos/Sistemas_de_Inyecci%C3%B3n_Diesel.pdf
- <http://www.arpem.com/coches/hyundai/tucson>
- http://www.meteored.com.ec/tiempo-en_Cuenca-America+Sur-Ecuador-Azuay--1-20244.html

TEMAS AFINES

- A-MAQ S.A.; 2005; Análisis de Maquinaria, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico.
- Criollo, O. y Matute, H. (2014). Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico Automotriz, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

- Guevara, P. E. 2011. Creación del módulo de vibraciones libres para el laboratorio virtual de vibraciones mecánicas. Quito. Ecuador.
- Meza Muñoz, S. V. 2006. Plan de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en la estación CPF de AGIP OIL. Quito. Ecuador.
- Rossas, G. (2004). Estudio de vibraciones mecánicas en máquinas reciprocantes. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Vega Galarza, D. M. 2014. Análisis y diagnóstico de vibraciones en vehículos livianos de combustión interna. Quito. Ecuador.

ANEXOS

ANEXO 1

ENCUESTAS SOBRE LAS VARIABLES MÁS INFLUYENTES EN LA VARIACIÓN DE VOLUMEN DE COMBUSTIBLE EN LOS INYECTORES EN UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA ALTERNATIVO A DIÉSEL

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 1

Nombre:	Cristian Garcia.	Fecha:	14-11-2014
Empresa:	Upo	Cargo:	Director General

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector				X
Presión de inyección				X
Régimen de giro			X	

Observaciones

Gracias por su colaboración

010389618

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 2

Nombre:	Juan Fernando Chica	Fecha:	12/11/2014
Empresa:	V. P. S.	Cargo:	Docente

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector				X
Presión de inyección				X
Régimen de giro				X

Observaciones

Gracias por su colaboración

JFC
0102220654

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 3

Nombre:	<i>Wilmar Contreras</i>	Fecha:	<i>14 - Nov - 2014</i>
Empresa:	<i>U. P. S.</i>	Cargo:	<i>Dorante</i>

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector (<i>Exterior o interior</i>)			X	
Presión de inyección				X
Régimen de giro (<i>rpm</i>)				X
Cantidad de aire de entrada (<i>MAF o MAP</i>)				X
Temp de refrigerante (<i>ECT</i>)			X	
Presión de admisión (<i>Turboalimentados</i>)			X	

Observaciones

Wilmar Contreras
Gracias por su colaboración

010446332-8.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 4

Nombre:	NÉSTOR RIVERA	Fecha:	14 Noviembre 2014
Empresa:	UPS	Cargo:	DOCENTE

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector				X
Presión de inyección				X
Régimen de giro			X	
TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE			X	
COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE			X	

Observaciones

Gracias por su colaboración

010339241) ,

7

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 5

Nombre:	Jorge Tajardo M	Fecha:	14/Nov/2014
Empresa:	UPS	Cargo:	Docente

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector			X	
Presión de inyección				X
Régimen de giro				X

Observaciones

Gracias por su colaboración

010344638.6

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 6


Nombre:	<i>Pablo Cumpoverde T</i>	Fecha:	<i>14/07/14</i>
Empresa:	<i>UPS</i>	Cargo:	<i>Técnico Docente</i>

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector			X	
Presión de inyección				X
Régimen de giro				X
<i>tiempo de inyección</i>				X
<i>temperatura del combustible</i>				X

Observaciones


 Gracias por su colaboración
 1103575021

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 7

Nombre:	Ing. Vicente Rojas	Fecha:	14-11-2014
Empresa:	Constructora E.Pesko	Cargo:	S. Sgerente

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector				✓
Presión de inyección				✓
Régimen de giro			✓	
Turbo				✓
Estado físico bomba alimentación				✓

Observaciones



Gracias por su colaboración

0106065519

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 8

Nombre:	<i>Ing. Iván Piedra</i>	Fecha:	<i>25-11-2014</i>
Empresa:	<i>Henicar S.A.</i>	Cargo:	<i>Jefe Servicio</i>

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector				X
Presión de inyección				X
Régimen de giro			X	

Observaciones

- Sistema de manejo el vehículo inyección convencional o sistema CRDI
- Zona geográfica donde funciona el vehículo.

Gracias por su colaboración

Martín
Centro de Ingeniería Automotriz
HENICAR S.A.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ENCUESTA N° 9

Nombre:	Ing. Henry Perantez	Fecha:	25/11/2014
Empresa:	Hemicar SA	Cargo:	Cooperante.

Pondere, de acuerdo a su criterio, la influencia de las siguientes variables en la variación de volumen de combustible en los inyectores de un motor de combustión interna alternativo a diésel. Si considera que existen otras variables diferentes a las citadas, por favor anótelas y coloque su ponderación según la siguiente escala:

- 1 - no tiene influencia
- 2 - tiene poca influencia
- 3 - tiene influencia
- 4 - tiene gran influencia

VARIABLE	1	2	3	4
Estado físico del inyector			✓	
Presión de inyección				✓
Régimen de giro			✓	

Observaciones

- Persistencia del Bobinado del Inyector.
 - Ángulo de Inyección.
 - Cantidad Inyectada o Volumen.

Gracias por su colaboración

Ing. Henry Perantez O.
 GERENTE
 Centro de Ingeniería Automotriz
 HEMICAR S.A.

ANEXO 2

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL
ACELERÓMETRO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS
EXPERIMENTALES**

CALIBRATION CERTIFICATE

s.n. 13502

Inspected Sensor: sensor A102-1A, s.n. 1875, nominal sensitivity 100 mV/g

Calibration method:
The sensor was calibrated according to ISO 16063-21: 2003.

Calibration result:
It was measured and calculated during calibration process, that the constant K of the measured sensor on the reference frequency 80 Hz is

Constant K [-] $\pm 3\%$	1.02
Sensitivity [mV/g] $\pm 3\%$	102
BIAS [V] $\pm 2\%$	11.9

where K is the rate of RMS value measured by sensor and RMS value of 1 g vibration acceleration, which operates with the sensor (reference value).

Conclusion: Submitted sensor has been inspected and complies with above specification.

Recommended validity:
We recommend next inspection before November 25, 2015.



Ostrava, Czech Republic
November 25, 2014


Ing. Karel Madera

Inspected by ADASH Ltd.,

Hlubinska 32/1379, 702 00 Moravska Ostrava - Czech Republic
tel: +420 596 232 670, fax: +420 596 232 671
e-mail: info@adash.cz, http://www.adash.cz

ANEXO 3

**SELECCIÓN DEL ESPECTRO PATRÓN PARA 820, 1660 Y
2500 RPM**

	CRDIMM 0 820 3 46	CRDIMM 0 820 3 11	CRDIMM 0 820 3 26	CRDIMM 0 820 3 41	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Desviación media 4	Mínimo
Potencia	9,185776517	11,62152387	11,45976765	11,07548872	10,83588419	1,650107673	0,785639883	0,623883462	0,240584527	0,240584527
Asimetría	-0,018654905	0,035804052	0,031299999	0,040709561	0,022289677	0,040944582	0,013514375	0,009010322	0,018419885	0,009010322
Curto	8,372429121	8,671773572	8,746949161	8,603646295	8,598699537	0,226270416	0,073074035	0,009010322	0,004946758	0,004946758
Mediana	-3,0759E-05	-2,50936E-05	-2,58694E-05	-2,90871E-05	-2,77013E-05	3,05474E-06	2,6077E-06	1,48249624	1,38581E-06	1,38581E-06
Moda	-0,000174642	-0,000435829	-0,000452876	-0,000202417	-0,000316441	0,000141799	0,000119388	0,000136435	0,000114024	0,000114024
Valor RMS	0,003030805	0,003409036	0,003385228	0,003328133	0,0032883	0,000257496	0,000120735	9,69276E-05	3,96327E-05	3,96327E-05
Factor de Cresta	7,341657446	8,856363873	9,230579779	8,95126434	8,59466636	1,253306914	0,261397514	0,635613419	0,356297981	0,261397514
Media	-9,25316E-07	4,07827E-06	-3,15711E-06	-2,5977E-06	-6,50463E-07	2,74852E-07	4,72873E-06	2,50664E-06	1,94724E-06	2,74852E-07
Varianza	9,18589E-06	1,16216E-05	1,14599E-05	1,10766E-05	1,0836E-05	1,65012E-06	7,85641E-07	6,2389E-07	2,40589E-07	2,40589E-07
Desviación estándar	0,003030823	0,003409054	0,003385247	0,003328152	0,003288319	0,000257496	0,000120735	9,6928E-05	3,96332E-05	3,96332E-05
Valor máximo	0,022251129	0,03019166	0,031247616	0,029790998	0,028370351	0,006119221	0,001821309	0,002877285	0,001420647	0,001420647
Valor mínimo	-0,02321371	-0,029648304	-0,027233362	-0,033678174	-0,028620303	0,004698932	0,001028001	0,00138694	0,005057871	0,001028001
Potencia en intervalo de frecuencia	0,087698203	0,078676578	0,07461712	0,068605128	0,077399257	0,010298946	0,00127732	0,002782137	0,008794129	0,00127732
Energía	0,752498812	0,952035236	0,938784166	0,907384317	0,887675633	0,135176821	0,064359603	0,051108533	0,019708684	0,019708684
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	27,49958039	27,49958039	27,49958039	27,49958039	27,49958039	0	0	0	0	0
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	54,87416269	54,87416269	54,87416269	54,87416269	54,87416269	0	0	0	0	0
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	82,12374689	82,12374689	81,24876024	82,24874488	81,93624975	0,187497139	0,187497139	0,68748951	0,312495232	0,187497139
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	109,4983292	109,4983292	108,6233425	109,4983292	109,2795825	0,218746662	0,218746662	0,656239987	0,218746662	0,218746662
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	136,8729115	136,8729115	296,3704777	136,8729115	176,7473031	39,87439157	39,87439157	119,6231747	39,87439157	39,87439157
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	239,9963379	13,74979019	282,6206876	287,3706151	205,9343577	34,06198026	192,1845675	76,68632986	81,43625738	34,06198026
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	273,745823	287,3706151	134,9979401	206,371851	225,6215573	48,12426568	61,74905778	90,62361719	19,24970627	19,24970627

Tabla A3.1 Selección de espectro patrón CRDIMM 0 820 3 41

	CRDIMM 0 1660 3 47	CRDIMM 0 1660 3 48	CRDIMM 0 1660 3 49	CRDIMM 0 1660 3 50	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Desviación media 4	Mínimo
Potencia	46,06115913	53,89064288	48,63797288	43,80866664	48,11211038	2,050951251	5,7765325	0,575862498	4,303443747	0,575862498
Asimetría	-0,027964097	0,024653031	-0,004911172	0,01037921	0,00539243	0,02850334	0,024113788	0,005450415	0,009839967	0,005450415
Curstosis	4,675313964	5,365124156	5,621272845	4,852639671	5,128587659	0,453273695	0,236556497	0,275947988	0,236556497	0,236556497
Mediana	1,68681E-05	1,72853E-05	1,03712E-05	8,9407E-06	1,33663E-05	3,50177E-06	3,91901E-06	2,99513E-06	4,42564E-06	2,99513E-06
Moda	-0,001426101	-6,79493E-06	-0,003079176	-0,000598742	-0,001277953	0,000148147	0,001271158	0,001801223	0,000678211	0,000148147
Valor RMS	0,006786837	0,007341025	0,006977677	0,006618812	0,006931088	0,00014425	0,000409937	4,65892E-05	0,000312276	4,65892E-05
Factor de Cresta	6,267411437	7,143894326	7,07962147	6,092814535	6,645950611	0,378639174	0,497943715	0,433731636	0,553136077	0,378639174
Media	-1,44456E-05	-7,39657E-06	-2,51876E-06	1,79524E-05	-1,60214E-06	1,28435E-05	5,79443E-06	9,16626E-07	1,95545E-05	9,16626E-07
Varianza	4,60615E-05	5,38912E-05	4,86386E-05	4,38089E-05	4,81125E-05	2,05104E-06	5,7767E-06	5,76011E-07	4,30367E-06	5,76011E-07
Desviación estándar	0,006786863	0,007341066	0,006977719	0,006618828	0,006931119	0,000144256	0,000409947	4,66E-05	0,000312291	4,66E-05
Valor máximo	0,042535901	0,052443504	0,0493399734	0,040327191	0,046176683	0,003640682	0,006286922	0,005223151	0,005849391	0,005223151
Valor mínimo	-0,042958379	-0,046916962	-0,047274351	-0,041217804	-0,044591874	0,001633495	0,002325088	0,002682477	0,00337407	0,001633495
Potencia en intervalo de frecuencia	0,108227054	0,096641287	0,042370755	0,124385982	0,092906269	0,015320785	0,003735017	0,050535515	0,031479713	0,003735017
Energía	3,773330156	4,414721465	3,988518738	3,588805971	3,941344083	0,168013926	0,473377382	0,047174656	0,352538112	0,047174656
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	202,6219082	206,6218472	200,1219464	201,6219235	202,7469063	0,124998093	3,874940873	2,624959946	1,124982834	0,124998093
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	233,7464333	167,6224423	230,9964753	109,6233273	186,4971695	48,24926377	17,87472725	45,49930574	75,87384226	17,87472725
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	110,1233197	111,8732929	81,62375452	287,6206113	147,8102446	37,68692494	35,93695165	66,18649007	139,8103667	35,93695165
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	288,8708974	293,6205197	108,7483406	232,8714467	226,0278011	42,84309627	67,59271862	117,2794605	6,843645574	6,843645574
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	82,62373926	181,6222287	163,1225109	267,6209164	173,7473488	91,12360956	7,874879839	10,62483788	93,8735676	7,874879839
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	165,1224804	153,6226559	66,74898149	46,24929429	107,935853	57,1866274	45,68680287	41,18687154	61,68655874	41,18687154
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	59,24909593	195,622015	265,745945	8,749866488	132,3417306	73,09263469	63,28028442	133,4042144	123,5918641	63,28028442

Tabla A3.2 Selección de espectro patrón CRDIMM 0 1660 3 49

	CRDIMM 0 2500 3 51	CRDIMM 0 2500 3 12	CRDIMM 0 2500 3 27	CRDIMM 0 2500 3 42	MEDIA	Desviacion media 1	Desviacion media 2	Desviacion media 3	Desviacion media 4	Mínimo
Potencia	352,5869507	542,5973184	472,4898231	564,7705649	483,1111693	130,5242186	59,48614916	10,62134614	81,65941558	10,62134614
Asimetría	0,167047199	0,025770132	0,01635759	0,06928238	0,08927529	0,097771909	0,043505158	0,0529177	0,001349051	0,001349051
Curiosis	9,245779361	17,49460968	18,91049649	16,79269457	15,61089502	6,365115663	1,863714654	3,296001462	1,181799548	1,181799548
Mediana	-6,27637E-05	4,3273E-05	-2,73585E-05	7,06911E-05	5,96046E-06	6,87242E-05	3,73125E-05	3,3319E-05	6,47306E-05	3,3319E-05
Moda	-0,016553164	-0,008479476	0,009785691	-0,012060642	-0,006826848	0,009726316	0,001652628	0,016612738	0,005233794	0,001652628
Valor RMS	0,01877299	0,023293718	0,021736831	0,023764902	0,021893188	0,003115889	0,001400531	0,000156357	0,001871715	0,000156357
Factor de Cresta	12,95034652	16,26328323	16,39576193	14,00921824	14,90465248	1,954305959	1,358630744	1,491109453	0,895434239	0,895434239
Media	-1,44722E-07	1,67198E-05	-1,34706E-05	1,70073E-05	5,02794E-06	5,17286E-06	1,16919E-05	1,84965E-05	1,19793E-05	5,1726E-06
Varianza	0,000352591	0,000542604	0,000472495	0,000564777	0,000483117	0,000130526	5,94868E-05	1,06215E-05	8,16603E-05	1,06215E-05
Desviación estándar	0,018777413	0,023293855	0,02173686	0,023765041	0,021893317	0,003115904	0,001400537	0,000156358	0,001871724	0,000156358
Valor máximo	0,243172526	0,37883234	0,356391907	0,332927704	0,327831119	0,084658593	0,051001221	0,028560787	0,005096585	0,005096585
Valor mínimo	-0,176189661	-0,364166021	-0,365404963	-0,327826142	-0,306396697	0,132207036	0,055769324	0,057008266	0,019429445	0,019429445
Potencia en intervalo de frecuencia	0,121338037	0,599731068	0,322102896	0,418960115	0,365533029	0,244194992	0,234198039	0,043430133	0,053427086	0,043430133
Energía	28,883923	44,446957233	38,70636631	46,26600631	39,57646699	10,69254399	4,873105339	0,870100676	6,689539325	0,870100676
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	85,87368967	210,8717824	208,4968186	211,6217709	179,2160154	93,34232571	31,65576697	29,28080321	32,40575553	29,28080321
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	171,6223813	126,6230679	125,1230908	126,9980622	137,5916505	34,03073073	10,96858263	12,46855974	10,59358835	10,59358835
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	128,7480355	103,7484169	83,49872591	190,4970932	126,6230679	2,124967576	22,87465096	43,12434197	63,87402536	2,124967576
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	257,3710728	231,99646	102,498436	232,7464486	206,1531044	51,21796848	25,84335566	103,6546684	26,59334422	25,84335566
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	214,3717289	189,7471047	249,9961854	84,74870684	184,7159315	29,65579749	5,03117323	65,2802539	99,96722462	5,03117323
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	105,3733921	84,37371256	291,8705464	104,1234112	146,4352656	41,06187345	62,06155302	145,4352808	42,31185437	41,06187345
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	235,8714009	283,8706685	229,7464943	253,9961243	250,871172	14,99977112	32,99949647	21,12467766	3,124952317	3,124952317

Tabla A3.3 Selección de espectro patrón CRDIMM 0 2500 3 27

ANEXO 4

SELECCIÓN DE LOS ESPECTROS DE FALLA

	CRDIMM 0 820 1 9	CRDIMM 0 820 1 24	CRDIMM 0 820 1 39	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	14,38916602	14,91416978	15,09425741	14,79919774	0,410031713	0,114972037	0,295059676	0,114972037
Asimetría	-0,067123052	-0,118330474	-0,094726092	-0,093393206	0,026270154	0,024937268	0,001332886	0,001332886
Curtoisía	9,660664737	10,14436615	10,77759414	10,19420834	0,533543607	0,049842192	0,583385799	0,049842192
Mediana	-4,94719E-06	-6,31809E-06	8,40425E-06	-9,53674E-07	3,99351E-06	5,36444E-06	9,35793E-06	3,99351E-06
Moda	-0,00391126	0,00341535	-9,21488E-05	-4,72466E-05	0,00343879	0,000388781	4,49022E-05	4,49022E-05
Valor RMS	0,003793305	0,003861887	0,003885133	0,003846775	5,34696E-05	1,51118E-05	3,83578E-05	1,51118E-05
Factor de Cresta	8,06529058	9,653488186	11,31866535	9,679148038	1,613887457	0,025659851	1,639517309	0,025659851
Media	-5,41196E-06	8,33077E-06	1,08148E-05	4,51121E-06	9,92318E-06	3,81956E-06	6,10362E-06	3,81956E-06
Varianza	1,43893E-05	1,49143E-05	1,50943E-05	1,47993E-05	4,09996E-07	1,14974E-07	2,95021E-07	1,14974E-07
Desviación estándar	0,003793325	0,003861901	0,003885142	0,003846789	5,34647E-05	1,5112E-05	3,83527E-05	1,5112E-05
Valor máximo	0,03059411	0,037280679	0,043974519	0,037283103	0,006688892	2,42392E-06	0,006691416	2,42392E-06
Valor mínimo	-0,031388402	-0,045867443	-0,03294158	-0,036732475	0,005344073	0,009134968	0,003790895	0,003790895
Potencia en intervalo de frecuencia	0,032115879	0,027941426	0,029971911	0,030009739	0,00210614	0,002066312	3,78279E-05	3,78279E-05
Energía	1,178760481	1,221768788	1,236521567	1,212350279	0,033589798	0,009418509	0,024171289	0,009418509
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	27,49958039	27,49958039	27,49958039	27,49958039	0	0	0	0
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	82,12374689	136,8729115	82,12374689	100,3734684	18,24972153	36,49844306	18,24972153	18,24972153
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	136,8729115	82,24874498	109,4983292	109,5399952	27,33291627	27,29125024	0,041666031	0,041666031
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	109,4983292	206,1218548	54,87416269	123,4981156	13,99978638	82,62373926	68,62395288	13,99978638
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	63,49903108	106,1233807	136,7479134	102,1234417	38,62441064	3,999938966	34,62447167	3,999938966
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	155,3726292	273,6208249	153,747654	194,247036	38,87440682	79,37378885	40,49938203	38,87440682
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	182,7472115	54,87416269	126,3730717	121,331482	61,41572954	66,45731928	5,041589738	5,041589738

Tabla A4.1 Selección de espectro de falla CRDIMM 0 820 1 24

	CRDIMM 10 820 2 2	CRDIMM 10 820 2 17	CRDIMM 10 820 2 32	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	9,636517876	9,641990568	10,06661504	9,761707829	0,145169853	0,139717261	0,284907213	0,139717261
Asimetría	-0,028130705	-0,0227232481	-0,013890931	-0,023084706	0,005045999	0,004147776	0,009193775	0,004147776
Curiosis	8,714509272	8,422709989	8,257441469	8,46488691	0,248622362	0,042176921	0,207445441	0,042176921
Mediana	-3,32594E-05	-2,81334E-05	-1,99676E-05	-2,71201E-05	6,13928E-06	1,01328E-06	7,16256E-06	1,01328E-06
Moda	-0,0005548	0,000704646	-0,000864267	-0,00023814	0,00031666	0,000942787	0,000626127	0,00031666
Valor RMS	0,003104274	0,003105155	0,003172793	0,003127408	2,31334E-05	2,2252E-05	4,53854E-05	2,2252E-05
Factor de Cresta	7,627031126	8,180265483	8,125208735	7,977501781	0,350470655	0,202763701	0,147706953	0,147706953
Media	-1,28638E-06	-6,44477E-07	1,13139E-06	-2,59823E-07	1,00659E-06	3,94654E-07	1,39121E-06	3,94654E-07
Varianza	9,63663E-06	9,64211E-06	1,00667E-05	9,78183E-06	1,45192E-07	1,39718E-07	2,84911E-07	1,39718E-07
Desviación estándar	0,003104293	0,003105174	0,003172812	0,003127426	2,31336E-05	2,22521E-05	4,53857E-05	2,22521E-05
Valor máximo	0,023676395	0,025400996	0,025779605	0,024952332	0,001275937	0,000448664	0,000827273	0,000448664
Valor mínimo	-0,026706715	-0,033113956	-0,028846264	-0,029355646	0,00324893	0,003758311	0,000509381	0,000509381
Potencia en intervalo de frecuencia	0,079613542	0,069512196	0,069024789	0,072716842	0,0068967	0,003204647	0,003692053	0,003204647
Energía	0,789423544	0,789871867	0,824657104	0,801317505	0,011893961	0,011445638	0,023339599	0,011445638
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	26,62459374	26,37456704	28,37456704	27,79124261	1,166648865	0,583324433	0,583324433	0,583324433
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	52,24920274	53,12418939	56,62413598	53,99917604	1,749973298	0,874986649	2,624959946	0,874986649
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	12,87480355	85,62369349	85,74869158	61,41572954	48,5402599	24,20796395	24,33296204	24,20796395
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	86,37368204	12,87480355	12,87480355	37,37442971	48,99925233	24,49962617	24,49962617	24,49962617
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	290,3705693	114,7482491	289,6205807	231,5797997	58,79076959	116,8315506	58,04078103	58,04078103
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	111,998291	137,7478981	114,8732472	121,5398121	9,541521075	16,20808602	6,666564943	6,666564943
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	269,8708821	298,8704396	104,1234112	224,2882443	45,5826378	74,5821953	120,1648331	45,5826378

Tabla A4.2 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 820 2 17

	CRDIMM -10 820 2 1	CRDIMM -10 820 2 16	CRDIMM -10 820 2 31	MEDIA	Desviacion media 1	Desviacion media 2	Desviacion media 3	Mínimo
Potencia	9,921206352	12,09330046	11,49511991	11,16987524	1,24869899	0,923425221	0,325244669	0,325244669
Asimetría	0,028237205	-0,059888851	-0,055407274	-0,028952974	0,057190178	0,030735878	0,0264543	0,0264543
Curstosis	7,93020916	8,032132354	7,850151261	7,937497591	0,007288432	0,094634763	0,087346331	0,007288432
Mediana	-3,85046E-05	-2,46763E-05	-2,85241E-05	-2,99017E-05	8,60294E-06	5,22534E-06	3,3776E-06	3,3776E-06
Moda	-0,001149854	-0,000227451	-0,000151992	-0,000509699	0,000639955	0,000282248	0,000357707	0,000282248
Valor RMS	0,003149794	0,003477542	0,003390445	0,003339261	0,000189466	0,000138282	5,11847E-05	5,11847E-05
Factor de Cresta	7,263233593	8,266528044	7,074689005	7,534816181	0,271582588	0,731711864	0,460129276	0,271582588
Media	2,95274E-06	-2,59986E-06	3,31211E-06	1,22166E-06	1,73108E-06	3,82152E-06	2,99049E-06	1,73108E-06
Varianza	9,92132E-06	1,20934E-05	1,14952E-05	1,117E-05	1,24869E-06	9,23439E-07	3,25246E-07	3,25246E-07
Desviación estándar	0,003149812	0,003477563	0,003390464	0,00333928	0,000189467	0,000138283	5,11847E-05	5,11847E-05
Valor máximo	0,02877693	0,028747201	0,02398634	0,025203745	0,000326051	0,003543456	0,001217405	0,001217405
Valor mínimo	-0,023242593	-0,029024839	-0,024467845	-0,025578459	0,002335866	0,00344638	0,001110514	0,001110514
Potencia en intervalo de frecuencia	0,080313381	0,069125013	0,069617946	0,07301878	0,007294601	0,0038993767	0,003400834	0,003400834
Energía	0,812745142	0,990683174	0,941680223	0,91503618	0,102291037	0,075648994	0,026644043	0,026644043
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	27,49958039	27,49958039	27,49958039	27,49958039	0	0	0	0
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	54,87416269	54,87416269	54,87416269	54,87416269	0	0	0	0
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	82,12374689	82,24874498	82,12374689	82,16541292	0,041666031	0,083332062	0,041666031	0,041666031
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	109,4983292	287,3706151	287,3706151	228,0798531	118,5815239	59,29076196	59,29076196	59,29076196
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	136,8729115	109,4983292	109,4983292	118,62319	18,24972153	9,124860766	9,124860766	9,124860766
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	13,74979019	136,8729115	273,6208249	141,4145089	127,6647187	4,541597367	132,206316	4,541597367
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	273,6208249	273,6208249	136,8729115	228,0381871	45,5826378	45,5826378	91,16527559	45,5826378

Tabla A4.3 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 820 2 31

	CRDIMM 0 1660 2 13	CRDIMM 0 1660 2 14	CRDIMM 0 1660 2 15	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	58,66366723	54,19400657	55,87468883	56,24412088	2,419546353	2,050114309	0,369432044	0,369432044
Asimetría	0,004305183	-0,043502053	-0,020525795	-0,019907555	0,024212738	0,023594498	0,00061824	0,00061824
Curtosis	5,662191537	5,37073188	5,383425192	5,472116203	0,190075334	0,101384323	0,088691011	0,088691011
Mediana	1,013228E-06	1,68893E-06	1,95503E-05	7,47084E-06	6,39757E-06	5,74191E-06	1,21395E-05	5,74191E-06
Moda	-0,000112534	0,000789762	-0,000291705	0,000128508	0,000241041	0,000661254	0,000420213	0,000241041
Valor RMS	0,007659221	0,007361658	0,007474937	0,007498605	0,000160616	0,000136948	2,36681E-05	2,36681E-05
Factor de Cresta	6,628243644	5,661668046	6,535371135	6,274482942	0,353760703	0,612814896	0,259054193	0,259054193
Media	8,77055E-06	1,20345E-05	-3,79859E-06	5,68883E-06	3,10173E-06	6,36565E-06	9,46738E-06	3,10173E-06
Varianza	5,86643E-05	5,41945E-05	5,58754E-05	5,62447E-05	2,41958E-06	2,05021E-06	3,69372E-07	3,69372E-07
Desviación estándar	0,007659263	0,007361693	0,007474982	0,007498646	0,000160617	0,000136953	2,36639E-05	2,36639E-05
Valor máximo	0,050767183	0,041679263	0,048837781	0,047094742	0,003672441	0,005415479	0,001743038	0,001743038
Valor mínimo	-0,058878303	-0,050917149	-0,048740506	-0,052845319	0,006032983	0,001928171	0,004104813	0,001928171
Potencia en intervalo de frecuencia	0,0921663	0,097304231	0,131507651	0,106992727	0,014826428	0,009688497	0,024514924	0,009688497
Energía	4,805727619	4,439573018	4,577254509	4,607518382	0,198209237	0,167945364	0,030263873	0,030263873
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	205,4968644	204,996872	206,7468453	205,7468606	0,249996185	0,749988556	0,999984741	0,249996185
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	55,87414743	55,62415124	56,24914171	55,91581346	0,041666031	0,291662216	0,333328247	0,041666031
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	195,2470208	166,9974518	112,3732853	158,2059193	37,04110146	8,791532519	45,83263398	8,791532519
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	83,7487221	68,2489586	293,7455178	148,5810662	64,83234407	80,33210756	145,1644516	64,83234407
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	111,6232968	139,2478752	238,6213589	163,164177	51,54088022	23,91630173	75,45718195	23,91630173
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	222,8715992	271,4958573	68,99894716	187,7888012	35,08279801	83,70705607	118,7898541	35,08279801
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	274,2458153	236,6213894	275,7457925	262,2043324	12,04148293	25,58294297	13,54146004	12,04148293

Tabla A4.4 Selección de espectro de falla CRDIMM 0 1660 2 15

	CRDIMM 10 1660 1 21	CRDIMM 10 1660 1 36	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Mínimo
Potencia	33,1536865	41,12938817	37,14153733	3,987850834	3,987850834	3,987850834
Asimetría	-0,022283318	-0,077387634	-0,049635476	0,027552158	0,027552158	0,027552158
Curtosis	7,321243089	8,523927228	7,922595158	0,601342069	0,601342069	0,601342069
Mediana	1,82986E-05	6,5651E-06	1,24278E-05	5,87108E-06	5,87108E-06	5,87108E-06
Moda	0,000499606	-0,002275944	-0,000888169	0,001387775	0,001387775	0,001387775
Valor RMS	0,005757924	0,00641322	0,006085572	0,000327648	0,000327648	0,000327648
Factor de Cresta	8,715188076	11,29440031	10,00479419	1,289606118	1,289606118	1,289606118
Media	-3,16122E-06	-9,1606E-06	-6,16091E-06	2,99969E-06	2,99969E-06	2,99969E-06
Varianza	3,31541E-05	4,11298E-05	3,71419E-05	3,98786E-06	3,98786E-06	3,98786E-06
Desviación estándar	0,005757958	0,006413252	0,006085605	0,000327647	0,000327647	0,000327647
Valor máximo	0,050181389	0,072433472	0,06130743	0,011126041	0,011126041	0,011126041
Valor mínimo	-0,071278691	-0,071342826	-0,071310759	3,20673E-05	3,20673E-05	3,20673E-05
Potencia en intervalo de frecuencia	0,087919114	0,104396811	0,096157963	0,008238849	0,008238849	0,008238849
Energía	2,715949988	3,369319479	3,042634738	0,32668474	0,32668474	0,32668474
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	92,99858095	199,621954	146,3102675	53,31168653	53,31168653	53,31168653
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	179,9972535	55,62415124	117,8107024	62,18655111	62,18655111	62,18655111
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	44,3743229	8,499870302	26,4370966	17,9372263	17,9372263	17,9372263
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	106,2483788	177,1222973	141,8853381	35,43695927	35,43695927	35,43695927
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	58,49910737	111,7482949	85,12370112	26,62459374	26,62459374	26,62459374
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	196,6219998	127,4980545	162,0600272	34,56197263	34,56197263	34,56197263
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	15,87475777	40,49938203	28,1870699	12,31231213	12,31231213	12,31231213

Tabla A4.5 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 1660 1 21

	CRDIMM -10 1660 1 5	CRDIMM -10 1660 1 20	CRDIMM -10 1660 1 35	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	149,4267041	150,0813756	151,0241712	150,1774169	0,750712883	0,096041378	0,846754261	0,096041378
Asimetría	0,040071495	0,029161736	0,013565834	0,027598155	0,01247334	0,001568981	0,014042321	0,001568981
Curtosis	4,012056608	3,890191824	3,775287754	3,892512062	0,119544546	0,002320238	0,117224308	0,002320238
Mediana	-3,83258E-05	-8,52346E-05	-6,41942E-05	-6,25849E-05	2,42591E-05	2,26498E-05	1,60933E-06	1,60933E-06
Moda	-0,001212478	-0,003116965	0,000244141	-0,001361767	0,00014929	0,001755198	0,001605908	0,00014929
Valor RMS	0,012224022	0,01225077	0,012289189	0,01225466	3,06388E-05	3,89E-06	3,45288E-05	3,89E-06
Factor de Cresta	5,58153798	5,45783654	5,847955494	5,629110005	0,047572025	0,171273465	0,21884549	0,047572025
Media	1,83147E-06	-4,64229E-06	-8,56171E-07	-1,22232E-06	3,05379E-06	3,41994E-06	3,66146E-07	3,66146E-07
Varianza	0,000149429	0,000150083	0,000151026	0,000150179	7,50717E-07	9,60556E-08	8,46772E-07	9,60556E-08
Desviación estándar	0,012224096	0,012250844	0,012289264	0,012254735	3,06388E-05	3,89056E-06	3,45293E-05	3,89056E-06
Valor máximo	0,068228841	0,068682702	0,071866632	0,068986058	0,000757217	0,002123356	0,002880573	0,000757217
Valor mínimo	-0,061747551	-0,054187655	-0,057296276	-0,057743828	0,004003723	0,003556172	0,000447551	0,000447551
Potencia en intervalo de frecuencia	0,606629284	0,562997942	0,58369455	0,584440592	0,022188691	0,02144265	0,000746042	0,000746042
Energía	12,2410356	12,29466629	12,37190011	12,302534	0,061498399	0,00786771	0,069366109	0,00786771
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	63,49903108	62,49904634	62,62404443	62,87404062	0,624990463	0,374994278	0,249996185	0,249996185
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	126,748066	125,2480889	125,1230908	125,7064152	1,041650772	0,45832634	0,583324433	0,45832634
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	190,122099	187,6221371	187,6221371	188,4554577	1,666641236	0,833320618	0,833320618	0,833320618
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	95,12354853	93,74856951	297,1204663	161,9975281	66,87397958	68,2489586	135,1229382	66,87397958
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	77,87381174	76,74882891	93,8735676	82,83206942	4,958257676	6,08324051	11,04149819	4,958257676
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	158,4975815	250,1211835	76,873827	161,830864	3,333282471	88,29031946	84,95703699	3,333282471
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	253,496132	296,9954682	156,3726139	235,6214047	17,87472725	61,37406351	79,24879076	17,87472725

Tabla A4.6 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 1660 1 20

	CRDIMM 10 1660 3 23	CRDIMM 10 1660 3 38	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Mínimo
Potencia	26.52207591	24.23333626	25.37770608	1.144369825	1.144369825	1.144369825
Asimetría	-0.0058886577	-0.040123728	-0.023005153	0.017118576	0.017118576	0.017118576
Curstosis	5.688257951	5.392221178	5.530239564	0.138018387	0.138018387	0.138018387
Mediana	5.24521E-06	2.6228E-06	3.93391E-06	1.3113E-06	1.3113E-06	1.3113E-06
Moda	0.000823498	0.00606775	0.000715137	0.000108361	0.000108361	0.000108361
Valor RMS	0.005149959	0.004922737	0.005036348	0.000113611	0.000113611	0.000113611
Factor de Cresta	5.890143367	6.200812919	6.045478143	0.155334776	0.155334776	0.155334776
Media	5.47413E-06	1.65498E-06	3.56456E-06	1.90957E-06	1.90957E-06	1.90957E-06
Varianza	2.65224E-05	2.42336E-05	2.5378E-05	1.14437E-06	1.14437E-06	1.14437E-06
Desviación estándar	0.005149987	0.004922766	0.005036377	0.00011361	0.00011361	0.00011361
Valor máximo	0.030333996	0.030524989	0.030429482	9.54866E-05	9.54866E-05	9.54866E-05
Valor mínimo	-0.036236167	-0.03426671	-0.035251439	0.000984728	0.000984728	0.000984728
Potencia en intervalo de frecuencia	0.217810687	0.21577648	0.216793583	0.001017104	0.001017104	0.001017104
Energía	2.172688458	1.985194906	2.078941882	0.093746776	0.093746776	0.093746776
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	51.74921037	51.37421609	51.56171323	0.187497139	0.187497139	0.187497139
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	104.1234112	102.6234341	103.3734226	0.749988556	0.749988556	0.749988556
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	90.87361338	87.74866106	89.31113722	1.562476159	1.562476159	1.562476159
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	156.3726139	154.4976426	155.4351282	0.937485695	0.937485695	0.937485695
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	38.87440682	247.6212216	143.2478142	104.3734074	104.3734074	104.3734074
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	248.7462044	286.1206341	267.4334193	18.68721486	18.68721486	18.68721486
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	293.995514	211.9967652	252.9961396	40.9993744	40.9993744	40.9993744

Tabla A4.7 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 1660 3 23

	CRDIMM -10 1660 3 7	CRDIMM -10 1660 3 22	CRDIMM -10 1660 3 37	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	160.7128906	176.543291	176.5495062	171.2685626	10.55567196	5.274728374	5.280943562	5.274728374
Asimetría	0.058977966	0.053045186	0.041516575	0.051179909	0.007798057	0.001865277	0.000966334	0.001865277
Curtosis	3.741269736	3.822685201	3.5633839439	3.709264792	0.032004944	0.113420409	0.145425353	0.032004944
Mediana	-0.000120819	-5.27501E-05	-9.73344E-05	-9.0301E-05	3.05176E-05	3.75509E-05	7.03335E-06	7.03335E-06
Moda	-0.01054764	-0.010570407	-0.011277199	-0.007634123	0.006579359	0.002936284	0.003643076	0.002936284
Valor RMS	0.012677259	0.013286959	0.013287193	0.013083804	0.000406545	0.000203157	0.000203369	0.000203157
Factor de Cresta	5.08315637	4.863757452	4.864039682	4.936884501	0.146171869	0.07294462	0.07294462	0.07294462
Media	3.13207E-07	-1.18256E-07	-2.4038E-07	0.000171271	3.2835E-07	1.03113E-07	2.25237E-07	1.03113E-07
Varianza	0.000160715	0.000176545	0.000176552	0.000171271	1.0558E-05	5.27479E-06	5.28101E-06	5.27479E-06
Desviación estándar	0.012677336	0.013287041	0.013287274	0.013083884	0.000406548	0.000203157	0.000203361	0.000203157
Valor máximo	0.064440489	0.064624548	0.064629436	0.064564824	0.000124335	5.97239E-05	6.46114E-05	5.97239E-05
Valor mínimo	-0.058446407	-0.060289145	-0.055978417	-0.05823799	0.000202848	0.002051155	0.002259572	0.000208418
Potencia en intervalo de frecuencia	0.594342871	0.581030025	0.60293249	0.592768462	0.001574409	0.011738437	0.010164028	0.001574409
Energía	13.1656	14.4624264	14.46293555	14.03032085	0.864720647	0.432105748	0.432614898	0.432105748
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	63.2490349	62.99903871	63.2490349	63.16570283	0.083332062	0.166664124	0.083332062	0.083332062
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	126.2480736	125.8730793	126.4980698	126.2064076	0.041666031	0.333328247	0.291662216	0.041666031
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	189.3721104	188.872118	189.6221066	189.2687783	0.083332062	0.416660309	0.333328247	0.083332062
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	94.74855425	94.49855807	94.87355234	94.70688822	0.041666031	0.208330154	0.166664124	0.041666031
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	77.49881746	251.7461587	110.623312	146.6227627	69.12394525	105.1233959	35.99945069	35.99945069
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	157.747593	298.8704396	77.62381555	178.080616	20.33302308	120.7898236	100.4568005	20.33302308
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	252.3711491	157.3725987	252.7461434	220.8298637	31.54118539	63.45736505	31.91617966	31.54118539

Tabla A4.8 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 1660 3 22

	CRDIMM 0 2500 1 10	CRDIMM 0 2500 1 25	CRDIMM 0 2500 1 40	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	386,7886868	446,9798904	557,2473803	463,6719192	76,88323236	16,6922288	93,57546117	16,6922288
Asimetría	0,491306397	0,59459875	0,44982384	0,511909177	0,02060278	0,062889573	0,062086793	0,02060278
Curtosis	7,787066678	9,689077022	6,653722212	8,043288637	0,56221959	1,645788384	1,389566425	0,256221959
Mediana	-0,000298877	-0,000311375	-0,000378668	-0,00032864	3,27627E-05	1,72655E-05	5,00282E-05	1,72655E-05
Moda	0,002438545	0,002386808	-0,023514152	-0,006229599	0,008668145	0,008616408	0,017284552	0,008616408
Valor RMS	0,019666944	0,021141894	0,023606088	0,021471642	0,001804698	0,000329748	0,002134446	0,000329748
Factor de Cresta	8,094150142	9,401990456	7,933231055	8,476457218	0,382367075	0,925533238	0,543226163	0,382367075
Media	7,34415E-06	-4,21971E-06	1,52627E-05	6,12904E-06	1,21511E-06	1,03488E-05	9,13364E-06	1,21511E-06
Varianza	0,000366793	0,00046985	0,00057254	0,000463677	7,68841E-05	1,66923E-05	9,35765E-05	1,66923E-05
Desviación estándar	0,019667063	0,021142023	0,023606227	0,021471771	0,001804708	0,000329748	0,002134456	0,000329748
Valor máximo	0,159187198	0,198775887	0,187272549	0,181745211	0,022558014	0,017030676	0,005627337	0,005627337
Valor mínimo	-0,121459842	-0,138875604	-0,148737073	-0,136357506	0,014897664	0,002518098	0,012379567	0,002518098
Potencia en intervalo de frecuencia	0,039406848	0,063053912	0,062954932	0,054805231	0,016398382	0,008248681	0,008149701	0,008149701
Energía	31,68572922	36,61657624	45,6487054	37,98400362	6,298274395	1,367427384	7,665701779	1,367427384
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	84,24871447	84,24871447	83,7487221	84,08205034	0,166664124	0,166664124	0,333328247	0,166664124
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	168,2474327	168,4974289	102,8734303	146,5394307	21,7080021	21,95799828	43,66600038	21,7080021
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	126,2480736	126,3730717	167,3724461	139,9978638	13,74979019	13,6247921	27,3745823	13,6247921
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	252,3711491	252,6211453	250,9961701	251,9961548	0,374994278	0,624990463	0,999984741	0,374994278
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	103,4984207	210,6217862	125,4980851	146,5394307	43,04100991	64,08235551	21,0413456	21,0413456
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	210,2467919	189,4971085	209,1218091	202,9552365	7,291555406	13,45812798	6,166572572	6,166572572
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	189,2471123	103,6234188	188,2471276	160,3725529	28,87455941	56,74913408	27,87457467	27,87457467

Tabla A4.9 Selección de espectro de falla CRDIMM 0 2500 1 25

	CRDIMM 10 2500 2 4	CRDIMM -10 2500 2 19	CRDIMM 10 2500 2 34	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	507,4612627	532,2971751	479,6074683	506,455302	1,005960667	25,84187306	26,84783373	1,005960667
Asimetría	0,497891429	0,51045527	0,612521529	0,540289409	0,04239798	0,02983414	0,07223212	0,02983414
Curtosis	7,444159345	7,711250466	9,43852026	8,197976891	0,753817345	0,486726224	1,24054357	0,486726224
Mediana	-0,000391901	-0,000341833	-0,000429451	-0,000387728	4,17233E-06	4,58956E-05	4,17233E-05	4,17233E-06
Moda	0,00886786	-0,014594793	-0,013493299	-0,006406744	0,015274604	0,008188049	0,007086555	0,007086555
Valor RMS	0,022526901	0,023071566	0,021899942	0,02249947	2,74311E-05	0,000572097	0,000599528	2,74311E-05
Factor de Cresta	8,245162909	8,229062587	9,575911543	8,683379013	0,438216104	0,454316426	0,89253253	0,438216104
Media	-9,284E-06	-8,51628E-06	1,39218E-05	-1,29284E-06	7,99116E-06	7,22344E-06	1,52146E-05	7,22344E-06
Varianza	0,000507467	0,000532304	0,000479613	0,000506461	1,006E-06	2,58422E-05	2,68482E-05	1,006E-06
Desviación estándar	0,022527036	0,023071706	0,021900071	0,022499605	2,74319E-05	0,000572101	0,000599533	2,74319E-05
Valor máximo	0,185737967	0,189857364	0,209711909	0,195102413	0,009364446	0,00524505	0,014609496	0,00524505
Valor mínimo	-0,140983105	-0,147626281	-0,147307634	-0,145303673	0,004322569	0,002320608	0,002001961	0,002001961
Potencia en intervalo de frecuencia	0,064313448	0,069330653	0,062991876	0,065545285	0,001231836	0,003785245	0,002553409	0,001231836
Energía	41,57122654	43,60578458	39,2894438	41,48881834	0,082408298	2,116966241	2,199374539	0,082408298
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	84,74870684	84,74870684	84,24871447	84,58204271	0,166664124	0,166664124	0,333328247	0,166664124
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	169,3724156	169,3724156	168,4974289	169,0807534	0,291662216	0,291662216	0,583324433	0,291662216
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	104,1234112	253,9961243	126,3730717	161,4975357	57,37412454	92,49858858	35,12446404	35,12446404
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	253,9961243	127,1230603	103,6234188	161,5808678	92,41525652	34,45780755	57,95744897	34,45780755
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	127,1230603	104,1234112	252,6211453	161,2892056	34,16614533	57,16579439	91,33193972	34,16614533
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	211,746769	211,746769	210,6217862	211,3717747	0,374994278	0,374994278	0,749988556	0,374994278
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	190,4970932	190,6220913	189,4971085	190,205431	0,291662216	0,416660309	0,708322525	0,291662216

Tabla A4.10 Selección de espectro de falla CRDIMM 10 2500 2 4

	CRDIMM -10 2500 2 3	CRDIMM -10 2500 2 18	CRDIMM -10 2500 2 33	MEDIA	Desviación media 1	Desviación media 2	Desviación media 3	Mínimo
Potencia	676,5359689	502,158871	645,0248115	607,9065504	68,62941841	105,7476794	37,11826101	37,11826101
Asimetría	-0,021160416	-0,05527038	0,042938874	-0,011163974	0,00996442	0,044106406	0,054102848	0,00996442
Curtosis	15,72451641	18,73231984	14,52812591	16,32820272	0,603804312	2,40399118	1,800194807	0,603804312
Mediana	-8,9407E-07	3,618E-05	-4,02331E-05	-1,64908E-06	7,54992E-07	3,78291E-05	3,85841E-05	7,54992E-07
Moda	-0,011345267	-0,019339204	-0,008767128	-0,013160533	0,001805266	0,006188671	0,004383405	0,001805266
Valor RMS	0,026010305	0,022408902	0,025397339	0,024605615	0,00140479	0,002196614	0,000791824	0,000791824
Factor de Cresta	13,84028369	15,68490786	13,51453052	14,34657402	0,506290334	1,338333838	0,832043504	0,506290334
Media	-2,56234E-05	1,75783E-06	-5,61283E-06	-9,82812E-06	1,57972E-05	1,158339E-05	4,21329E-06	4,21329E-06
Varianza	0,000676544	0,000502165	0,000645033	0,000607914	6,86288E-05	0,000105749	3,71189E-05	3,71189E-05
Desviación estándar	0,026010451	0,022409038	0,025397493	0,024605661	0,00140479	0,002196623	0,000791832	0,000791832
Valor máximo	0,359990001	0,351481557	0,342333109	0,351588222	0,008421779	8,66652E-05	0,008335114	8,66652E-05
Valor mínimo	-0,37136972	-0,362204075	-0,3685323	-0,367368698	0,004001021	0,001163602	0,001163602	0,001163602
Potencia en intervalo de frecuencia	0,683159872	0,431920737	0,577467971	0,56418286	0,118977012	0,132282123	0,013285111	0,013285111
Energía	55,42182657	41,13685472	52,84043255	49,79970461	5,622121956	8,662849898	3,040727942	3,040727942
Valor de frecuencia en la cual se dio el valor pico	216,8716908	207,74683	216,9966889	213,8717366	2,999594224	6,124906541	3,124952317	2,999594224
Valor de frecuencia en la cual se dio el segundo valor pico	130,1230145	124,6230984	130,3730107	128,3730412	1,749973298	3,74994278	1,9998969483	1,749973298
Valor de frecuencia en la cual se dio el tercer valor pico	106,6233731	102,1234417	106,8733692	105,206728	1,41664505	3,083286286	1,666641236	1,41664505
Valor de frecuencia en la cual se dio el cuarto valor pico	238,4963608	249,2461968	238,746357	242,1629716	3,666610719	7,083225252	3,416614533	3,416614533
Valor de frecuencia en la cual se dio el quinto valor pico	260,246029	83,12373163	195,2470208	179,5389271	80,70710184	96,41519549	15,70809365	15,70809365
Valor de frecuencia en la cual se dio el sexto valor pico	173,4973526	228,3715153	260,3710271	220,7466317	47,24927903	7,624883654	39,62439538	7,624883654
Valor de frecuencia en la cual se dio el séptimo valor pico	31,12452508	166,1224652	59,62409021	85,62389349	54,49916841	80,49877169	25,99960328	25,99960328

Tabla A4.11 Selección de espectro de falla CRDIMM -10 2500 2 33