

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

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

“ESTUDIO DE LOS EFECTOS EN LAS EMISIONES DE ÓXIDOS
NITROSOS, DE UN MOTOR CRDI HYUNDAI SANTA FE 2.0,
MEDIANTE EL CONTROL DIFUSO DE LA VÁLVULA EGR”.

AUTORES:

Xavier Marcelo Guamán Agudo.

Omar Danilo Sigüenza Garzón.

TUTOR:

Ing. Wilmer Contreras M.Sc.

Cuenca, Enero 2017

CESION DE DERECHOS DE AUTOR.

Nosotros, Xavier Marcelo Guamán Agudo, con documento de identificación N° 0105158810 y Omar Danilo Sigüenza Garzón con documento de identificación N° 0103815015, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico de grado intitulado: ***“ESTUDIO DE LOS EFECTOS EN LAS EMISIONES DE ÓXIDOS NITROSOS, DE UN MOTOR CRDI HYUNDAI SANTA FE 2.0, MEDIANTE EL CONTROL DIFUSO DE LA VÁLVULA EGR”***, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, Enero del 2017.



Guamán Agudo Xavier Marcelo

C.I.: 0105158810



Sigüenza Garzón Omar Danilo

C.I.: 0103815015

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: *“Estudio de los efectos en las emisiones de óxidos nitrosos, de un motor CRDI Hyundai Santa Fe 2.0, mediante el control difuso de la válvula EGR”*, realizado por los estudiantes, Xavier Marcelo Guamán Agudo y Omar Danilo Sigüenza Garzón, obteniendo el Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Enero del 2017.



Ing. Wilmer Contreras M.Sc.

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA

Nosotros, Xavier Marcelo Guamán Agudo Cédula: 0105158810 y Omar Danilo Sigüenza Garzón Cédula: 0103815015, autores del Trabajo de Titulación *“Estudio de los efectos en las emisiones de óxidos nitrosos, de un motor CRDI Hyundai Santa Fe 2.0, mediante el control difuso de la válvula EGR”*, certificamos que el total contenido del Proyecto Técnico son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, Enero del 2017.



Guamán Agudo Xavier Marcelo

C.I.: 0105158810



Sigüenza Garzón Omar Danilo

C.I.: 0103815015

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme el ímpeto y el coraje espiritual para no declinar.

A mis padres, por ser uno de los pilares fundamentales, quienes con su apoyo y amor absoluto inspiraron la culminación de mi carrera universitaria. Expreso también mi gratitud a mi abuelo, mi hermana y mi sobrina. Estas palabras jamás serán lo bastante suficiente para testificar mi estimación y reconocimiento hacia ellos.

Al Ing. Wilmer Contreras docente tutor del presente trabajo de titulación, gracias por confiar en mi capacidad como estudiante, por su ayuda, y meritoria contribución para la culminación de esta investigación.

A mis familiares y amistades quienes de manera desinteresada me procuraron palabras de aliento.

Xavier G.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Madre Elva Garzón a la cual le debo toda la vida y mucho más, a mi padre José Sigüenza que se ha asegurado que nunca me falte absolutamente nada ni en lo material ni en lo sentimental, a mis padres les agradezco por enseñarme todos los buenos valores y a ser humilde y agradecido por todo lo que la vida me ha dado.

A mis hermanos Paul, Dayanne, y Juan los cuales me han ayudado en todo trayecto de mi vida incondicionalmente y siempre han confiado en mi para lograr las metas que me propuesto.

También agradezco a toda mi familia que de una u otra forma me han ayudado y brindado un apoyo en esta etapa universitaria.

Agradezco a mis amigos por compartir gratos momentos y por brindarme motivación para nunca rendirme.

Por ultimo le agradezco al Ingeniero Wilmer Contreras que nos ha colaborado con sus enseñanzas académicas.

Omar S.

DEDICATORIA

Bernardita y Luis por su paciencia, apoyo y sacrificio, queridos padres este nuevo logro en mi vida profesional va dedicado a ustedes.

Xavier G.

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación lo dedico a mis padres lo cuales han estado a mi lado en cada paso de mi vida siempre brindándome todo su apoyo incondicional en cada aspecto de mi vida.

Omar S.

RESUMEN

En este proyecto técnico de titulación se presenta el estudio de los efectos en las emisiones de óxidos nitrosos, de un motor CRDi Hyundai Santa Fe 2.0, mediante el control difuso de la válvula EGR.

Para este fin se obtuvieron señales de los diferentes sensores implicados en el funcionamiento del sistema EGR del motor diésel CRDi Hyundai Santa Fe 2.0, con el uso de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ NI USB 6212), durante diferentes parámetros de funcionamiento del motor, con el objetivo de conocer los diferentes porcentajes de apertura de la válvula EGR, todas las señales obtenidas fueron procesadas con filtros virtuales dados por el software de programación, obteniendo así señales libres de ruido y perturbaciones.

Una vez obtenidas las señales y porcentajes de apertura del ancho de pulso de la señal PWM de activación del solenoide de la válvula EGR, se procedió al diseño de un controlador difuso, en un software de programación de instrumentación virtual (LabView), para ser aplicado en un motor diésel como un controlador externo del solenoide de la válvula EGR.

Establecido ya el diseño del controlador difuso, con su respectiva fusificación, funciones de membresía, conjuntos difusos y defusificación, se realizaron las pertinentes pruebas de emisiones de óxidos nitrosos con el uso de un analizador de gases MAHA MGT-5, las pruebas se realizaron en base a las normas ecuatorianas establecidas para el análisis de emisiones de motores de combustión interna en ralentí, para el análisis respectivo de variación, las pruebas se realizaron con el motor en condiciones normales así como el mismo ya implementado con un controlador difuso externo. Se constató que después de 30 segundos y una quinta prueba en un mismo rango de funcionamiento del motor, los valores de las muestras no tenían variación alguna por lo que se obtuvieron 10 muestras cada una de 1 minuto para un mismo régimen de funcionamiento del motor.

Para la validación de todas las muestras obtenidas se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), mediante este análisis se llegó a la conclusión que mediante a implementación de un controlador difuso externo, existe variación de emisiones de óxidos nitrosos notables.

Palabras clave: Emisiones, Lógica Difusa, LabView, Recirculación de Gases de Escape.

ABSTRACT

In this graduation technical project, it is presented a case study of the effects of nitrous oxide emissions from a CRDi Hyundai Santa Fe 2.0 engine, through a fuzzy control of the EGR valve.

To accomplish this purpose, signals were obtained from different sensors which are involved in the functioning way of the EGR system of the Hyundai Santa Fe 2.0 diesel engine, using a data acquisition card (DAQ NI USB 6212), during different working parameter of the motor, with the objective of grasping different percentages of the EGR valve opening. Every signal obtained was processed through digital filters given by software programming, accomplishing noise and disturbances free signals.

Once the signal and the activation percentage of the EGR valve were obtained, then came the fuzzy controller design in a virtual software programming instrument (LabView), to be applied in a diesel engine as an external controller of the EGR valve solenoid.

With the design of the fuzzy controller established, with its respective fuzzification, membership functions, fuzzy sets and defuzzification, emissions test were done for the nitrous oxide with the use of a MAHA MGT-5 emission analyzer, the tests were carried out based on the Ecuadorian standards established for the analysis of emissions of internal combustion engines at idle, For the respective analysis of variation, tests were performed with the motor under normal conditions as well as the same already implemented with the external fuzzy controller. It was found that after 30 seconds and a fifth test in the same engine operating range, the values of the samples did not have any variation whatsoever, so 10 samples were obtained each of 1 minute for a same regime of engine operation.

For the validation of all the samples obtained, an analysis of variance (ANOVA) was used, through this analysis it was concluded that through the implementation of an external fuzzy controller, there is notable variation of the nitrous oxide emissions.

Keywords: *Emissions, Fuzzy Logic, LabView, Nitrous Oxide, Exhaust Gas Recirculation*

INDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.	1
2.	Problema.	2
2.1.	Antecedentes.	2
2.2.	Importancia y alcance.	3
2.3.	Delimitación.	4
3.	OBJETIVOS.	5
3.1.	Objetivo general.	5
3.2.	Objetivos específicos.	5
4.	REVISIÓN DE LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS O ESTADO DEL ARTE.	5
4.1.	El Motor Diésel.	5
4.2.	El Sistema Common Rail Direct Injection (CRDI).	6
4.3.	Recirculación de los gases de escape.	7
4.3.1.	Sistema EGR (Recirculación de Gases de Escape).	8
4.4.	Sistemas de control EGR.	9
4.5.	Lógica difusa.	9
4.5.1.	Fusificación.	10
4.5.2.	Conjuntos difusos.	10
4.5.3.	Funciones de membresía.	13
4.5.4.	Desfusificación.	14
4.5.4.1.	Punto máximo.	14
4.5.4.2.	Centro de área.	15
4.5.4.3.	Centro de gravedad.	15
4.5.5.	Aplicaciones.	16
4.5.6.	Aplicaciones en el ámbito automotriz.	16
4.6.	Software de programación MATLAB.	17

4.7.	Software de programación LabView.	17
4.8.	Tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6212.	18
4.9.	Analizador de gases MAHA MGT 5.	18
5.	MARCO METODOLÓGICO.	19
5.1.	Estado general del banco didáctico CRDi Diésel.	19
5.1.1.	Descripción.	19
5.1.2.	Especificaciones técnicas banco didáctico CRDi Diésel.	19
5.1.3.	Especificaciones técnicas motor Hyundai Santa Fe 2.0	20
5.2.	Sistema EGR de un motor HYUNDAI SANTA FE CRDi 2.0.	21
5.2.1.	EGR Cooler.	21
5.2.2.	Concepto general del sistema EGR en un motor Hyundai CRDI 2.0. .	22
5.2.3.	Parámetros de funcionamiento del sistema EGR.	23
5.3.	Clasificación de sensores.	23
5.3.1.	Sensor de posición del cigüeñal (CKP).	24
5.3.2.	Sensor de posición del acelerador (APS).	25
5.3.3.	Sensor de flujo de masa de aire del tipo película de calor (AFS).	26
5.4.	Adquisición y clasificación de señales.	27
5.4.1.	Configuración de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212.	28
5.4.2.	Clasificación de valores de las señales obtenidas.	37
5.4.3.	Diseño e implementación del controlador Difuso.	39
5.4.3.1.	Protocolo de adquisición de señales e implementación de un controlador difuso.	39
5.4.3.2.	Fases de diseño e implementación de un controlador Difuso.	41
5.4.3.2.1.	Fase 1 (Obtención de señales).	42
5.4.3.2.2.	Fase 2 (Proceso de señales).	42
5.4.3.2.2.1.	Filtrado de señales.	42

5.4.3.2.2.2.	Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Revoluciones Por Minuto).	44
5.4.3.2.3.	Fase 3 (Sistema de lógica Difusa).	48
5.4.3.2.3.1.	Valores de entrada, salida y funciones de membresía.	51
5.4.3.2.3.2.	Reglas.	53
5.4.3.2.3.3.	Desfusificación.	55
5.4.3.2.3.4.	Prueba del sistema.	56
5.4.3.2.4.	Fase 4 (Generación de pulsos de salida (PWM)).	58
5.4.3.2.5.	Fase 5 (Implementación en el Motor)	61
5.4.3.2.5.1.	Estructura de bloques de funcionamiento del sistema Difuso.	61
5.4.3.2.5.2.	Implementación del controlador difuso en un motor Hyundai Santa Fe CRDi 2.0 Diésel.	63
5.4.3.2.5.3.	Etapas de potencia.	66
5.5.	Medición de emisiones de óxido nitroso.	67
5.5.1.	Estado Mecánico.	67
5.5.2.	Procedimientos de medición de emisiones de Óxido Nitroso.	70
5.5.3.	Emisiones de óxido nitroso de un motor Hyundai Santa Fe en condiciones normales de funcionamiento.	73
5.5.4.	Emisiones de óxido nitroso de un motor Hyundai Santa Fe con un controlador difuso de la válvula EGR.	75
6.	Análisis de resultados.	77
6.1.	Señales de entrada Filtradas.	78
6.2.	Resultados de respuesta del sistema difuso respecto a diferentes condiciones de funcionamiento del motor Hyundai Santa Fe 2.0 CRDi.	79
6.3.	Resultados de la variación emisiones de óxido nitroso.	81
6.4.	Análisis de varianza (ANOVA).	82
6.4.1.	Análisis de muestras obtenidas.	83

7.	CONCLUSIONES.	93
8.	RECOMENDACIONES.	94
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	96
10.	ANEXOS.	99
	ANEXO 1: Características principales del banco didáctico CRDi Diésel	99
	ANEXO 2: Valores de sensores y porcentaje de apertura de la válvula EGR (Plano).	100
	ANEXO 3: Valores de sensores y porcentaje de apertura de la válvula EGR (Pendiente de subida 2% a 5%).	101
	ANEXO 4: Valores de sensores y porcentaje de apertura de la válvula EGR (Pendiente de bajada 2% a 5%).	102
	ANEXO 5: VI completo del Sistema Difuso diseñado. Fuente: Autores.	103
	ANEXO 6: conexión de la ECM con el escáner Carman VG	104
	ANEXO 7: Valores de referencia y equivalencias para las pruebas del circuito de baja presión de combustible y compresión del motor	108
	ANEXO 8: Test para la comprobación de la cantidad de combustible inyectado a los cilindros del motor	109
	ANEXO 9: Test para la medición de compresión del motor	111

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Lógica difusa vs lógica clásica.	12
Figura 2. Conjuntos difusos para la variable estatura de una persona.	12
Figura 3. Formas de funciones típicas de membresía..	14
Figura 4. Punto máximo.....	15
Figura 5. Centro de área.....	15
Figura 6. Centro de gravedad.....	16
Figura 7. Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6212.	18
Figura 8. Analizador de gases MAHA MGT 5..	19
Figura 9. Sistema EGR (Motor Hyundai CRDI 2.0).....	21
Figura 10. Sistema de enfriamiento EGR (Motor Hyundai CRDI 2.0)..	21
Figura 11. Concepto general del sistema EGR (Motor Hyundai CRDI 2.0),.	22
Figura 12. Sistema de control lazo abierto para la EGR.	22
Figura 13: Funcionamiento del sistema EGR sin señal del APS.	23
Figura 14. Esquema eléctrico del sensor CKP (Motor Hyundai CRDI 2.0)	24
Figura 15. Ubicación del sensor CKP en el banco didáctico CRDi Diésel.....	25
Figura 16. Numero de pin sensor APS (Motor Hyundai CRDI 2.0),.....	26
Figura 17. Ubicación del APS en el banco didáctico CRDi Diésel..	26
Figura 18. Numero de pin sensor AFS (Motor Hyundai CRDI 2.0),.....	27
Figura 19. Ubicación del AFS en el banco didáctico.....	27
Figura 20. Configuración DAQ NI USB 6212 (New VI).	28

Figura 21. Configuración DAQ NI USB 6212 (DAQ Assist).	29
Figura 22. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Analog Input).....	29
Figura 23. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Analog Input).....	30
Figura 24. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Rename Input).	30
Figura 25. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Configuración AFS-APS).....	31
Figura 26. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Configuración EGR).....	31
Figura 27. Configuración DAQ NI USB 6212 (Configuración EGR).....	32
Figura 28. Configuración DAQ NI USB 6212 (Timing Settings).....	33
Figura 29. Configuración VI (Split Signals)..	33
Figura 30. . Configuración VI (While Loop)..	34
Figura 31. Configuración VI (From DDT).	34
Figura 32. Configuración VI (Waveform Chart).	35
Figura 33. Configuración VI (Build Array).	35
Figura 34. Configuración VI (write delimited spreadsheet.vi).	36
Figura 35. VI para adquisición de datos de sensores. Fuente: Autores.....	36
Figura 36. Visualización con Matlab de los valores obtenidos mediante una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212 y LabView.	37
Figura 37. Flujograma de adquisición de datos e implementación de un controlador difuso.....	40
Figura 38. Diagrama de bloques para el diseño e implementación de un controlador Difuso.....	41
Figura 39. Visualización en LabView de señales obtenidas mediante una DAQ NI USB 6212 (Ralentí).....	42

Figura 40. Filtrado de señales AFS y APS en LabView (Filter).....	44
Figura 41. Filtrado de señales AFS y APS en LabView (Configure Filter).	44
Figura 42. Filtrado de señal CKP en LabView (Butterworth Filter).....	45
Figura 43. Filtrado de señal CKP en LabView (Butterworth Filter).....	45
Figura 44. Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Array).	46
Figura 45. Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Peak Detector).....	47
Figura 46. Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Peak Detector VI).	47
Figura 47. Programa conversor de la señal del sensor CKP revoluciones por minuto (VI).....	48
Figura 48. Señales de entrada filtradas y conversión de la señal del sensor CKP a RPM.	48
Figura 49. Protocolo de diseño de un controlador Difuso..	49
Figura 50. Diseño de un sistema Difuso mediante LabView (Fuzzy System Designer).....	50
Figura 51. Diseño de un sistema Difuso mediante LabView (Fuzzy System Designer).....	50
Figura 52. Funciones de membresía de entrada (RPM).....	52
Figura 53. Funciones de membresía de entrada (AFS).....	52
Figura 54. Funciones de membresía de entrada (APS).....	53
Figura 55. Función de membresía de salida (EGR).	53
Figura 56. Reglas del sistema difuso..	54
Figura 57. Elección del Método de Desfusicación en LabView.	56
Figura 58. Opciones de prueba del Sistema Difuso diseñado.....	56

Figura 59. Relación de variables de entrada y salida (AFS-RPM-EGR).....	57
Figura 60. Relación de variables de entrada y salida (APS-RPM-EGR).....	57
Figura 61. Relación de variables de entrada y salida (AFS-APS-EGR).....	57
Figura 62. Lectura del controlador difuso (FL Load Fuzzy System VI).	58
Figura 63. Controlador del sistema difuso (FL Fuzzy Controller VI).	58
Figura 64. Generación de pulsos de salida (PWM).....	59
Figura 65. Generación de pulsos de salida (Square Waveform VI).....	59
Figura 66. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output).....	60
Figura 67. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output).....	60
Figura 68. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output).....	60
Figura 69. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output).....	61
Figura 70. Estructura de bloques de funcionamiento del sistema Difuso. (A-B).	61
Figura 71. Estructura de bloques de funcionamiento del sistema Difuso. (C-D).	62
Figura 72. Conexión de señales de entrada y salida (DAQ NI USB 6212).	64
Figura 73. Conexión de señal de entrada y alimentación en el solenoide de la válvula EGR.....	64
Figura 74. Circuito de protección implementado en el puerto de salida señal (DAQ NI USB 6212).	64
Figura 75. Variación de vacío por acción del solenoide de la válvula EGR controlado por un Sistema Difuso.....	65
Figura 76. Etapa de potencia para Sistema de Control Difuso.	66
Figura 77. Pines de conexión de un módulo de encendido electrónico.	66
Figura 78. Pines de conexión de un módulo de encendido electrónico.	66

Figura 79. Señal sensor AFS sin filtro/ Señal sensor AFS filtrada.	78
Figura 80. Señal sensor APS sin filtro/ Señal sensor APS filtrada.	78
Figura 81. Señal del sensor CKP.	79
Figura 82. Variación de emisiones de óxido nitroso.	81
Figura 83. Histograma de distribución normal de probabilidad (Ralentí).	83
Figura 84. Histograma de distribución normal de probabilidad (1000 RPM).	84
Figura 85. Histograma de distribución normal de probabilidad (1500 RPM).	84
Figura 86. Histograma de distribución normal de probabilidad (2000 RPM).	84
Figura 87. Histograma de distribución normal de probabilidad (2200 RPM).	85
Figura 88. ICs simultáneos de 95% de Tukey (Ralentí).	87
Figura 89. ICs simultáneos de 95% de Tukey (1000 RPM).	87
Figura 90. ICs simultáneos de 95% de Tukey (1500 RPM).	88
Figura 91. ICs simultáneos de 95% de Tukey (2000 RPM)..	88
Figura 92. ICs simultáneos de 95% de Tukey (2200 RPM).	89
Figura 93. Grafica de intervalos (Ralentí-LD).	90
Figura 94. Grafica de intervalos (1000-LD).	90
Figura 95. Grafica de intervalos (1500rpm-LD).	91
Figura 96. Grafica de intervalos (2000rpm-LD).	91
Figura 97. Grafica de intervalos (2200rpm-LD).	92

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Tabla de especificaciones técnicas banco didáctico CRDi Diésel.	19
Tabla 2. Tabla de especificaciones técnicas (Motor Hyundai 2.0 CRDi).	20
Tabla 3. Pines del sensor CKP (Hyundai Santa Fe 2.0).	24
Tabla 4. Pines del sensor APS (Motor Hyundai Santa Fe 2.0).	25
Tabla 5. Pines del sensor AFS (Motor Hyundai Santa Fe 2.0).	27
Tabla 6. Tabla de valores clasificados (Apertura EGR 5% - 49,4%).	38
Tabla 7. Tabla de valores clasificados (Apertura EGR 51,4% - 95%).	38
Tabla 8. Tabla de valores clasificados (Apertura EGR 95%).	39
Tabla 9. Tabla de relación entre pulsos PWM y Depresión.	65
Tabla 10. Tabla de resultados de pruebas del estado mecánico del motor Hyundai Santa Fe 2.0.	69
Tabla 11. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) en Ralentí..	73
Tabla 12. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1000rpm.	74
Tabla 13. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1500rpm..	74
Tabla 14. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2000rpm..	74
Tabla 15. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2200rpm.	75
Tabla 16. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) en ralentí con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor.	75
Tabla 17. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1000rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor.	76
Tabla 18. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1500rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor..	76

Tabla 19. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2000rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor.	77
Tabla 20. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2200rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor.	77
Tabla 21. Tabla de valores de prueba del Sistema Difuso.	79
Tabla 22. Tabla de porcentajes de variación de emisiones de óxido Nitroso.	82

1. INTRODUCCION.

La necesidad de un control en las emisiones de gases contaminantes por parte de motores de encendido por compresión nace desde la implementación de normativas ambientales a nivel mundial que año tras año han sido más rigurosas.

Frente a la ventaja competitiva que supone su menor consumo, los motores diésel presentan dificultades en lo relativo a la satisfacción de los niveles regulados de emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno, NO_x cuyo marco normativo a nivel internacional es año tras año más estricto por lo cual ha llevado al avance tecnológico en el desarrollo de los motores diésel [1]. El principal enfoque en el desarrollo de los motores diésel es el de reducir las emisiones de óxidos nitrosos basándose en el diseño de sistemas de pos-tratamiento para el control de dichas emisiones como por ejemplo: trampas de NO_x (LNT) o catalizadores selectivos de reducción (SCR) el cual se basa en la inyección de urea en el escape las cuales han llegado a ser las más utilizadas en la actualidad, aunque en los últimos años los sistemas de recirculación de gases de escape (EGR) han llegado a ser uno de los sistemas clave para el control de NO_x.

Por otro lado, el sistema de inyección también ha experimentado una evolución notable, principalmente dominado por la tendencia a realizar inyecciones cada vez a mayor presión (en la actualidad más allá de 2000 bar mediante sistemas common-rail, que permiten altas presiones de inyección independientemente del régimen de giro), con orificios de inyección pequeños de geometría optimizada y un control preciso de la tasa de inyección; este tipo de sistemas permite la realización de múltiples inyecciones por cilindro y ciclo y la implementación de estrategias avanzadas de combustión (inyección piloto para el control del ruido, post-inyecciones para el control de las partículas y el control térmico del sistema de post-tratamiento, etc.). De esta forma, el control del sistema de inyección presenta particularidades enraizadas en la necesidad de una sincronización perfecta con la posición del cigüeñal [1].

La implementación de estas tecnologías que, además de presentar dificultades intrínsecas en su control, están fuertemente interrelacionadas, se ha hecho posible gracias a la generalización de los sistemas de control electrónicos. Dichos sistemas se han extendido en las aplicaciones de automoción y hoy en día constituyen uno de los elementos claves del motor. Su capacidad para explorar todos los grados de libertad del sistema dota al sistema de una gran flexibilidad, pero complica de forma extrema su definición y calibración [1].

Por lo tanto se considera que la implementación de nuevos sistemas de control de NOx no únicamente deberían depender de los sistemas de control empleados por la ECU (Engine Control Unit) por lo que se toma en cuenta el uso de nuevas estrategias de control incorporados a los motores diésel como el uso de nuevos sensores, estrategias de bucle cerrado, inteligencia artificial y más sistemas de control los cuales deben repercutir en la disminución de emisiones NOx.

La gestión de emisiones contaminantes con la incorporación de nuevos sistemas de control implementados al motor diésel determina la motivación para el desarrollo de la presente tesis la cual tiene como objetivo principal el disminuir las emisiones de óxidos nitrosos mediante el control de la válvula EGR.

2. Problema.

2.1. Antecedentes.

Un motor diésel tiene muchas ventajas en términos de consumo de combustible, eficiencia en la combustión y durabilidad, además, un motor diésel emite una cantidad relativamente pequeña de dióxido de carbono (CO₂, 12%), monóxido de carbono (CO, 0.3%) e hidrocarburos (HC, 0.3%). Sin embargo los motores diésel son una fuente significativa de emisiones de NOx y material particulado en áreas urbanas [2]. Una desventaja de este tipo de motor es que no se han encontrado todavía la solución definitiva a los problemas de las emisiones (principalmente óxidos de nitrógeno y partículas) [3].

Las normativas ecuatorianas NTE INEN 2202 y NTE INEN 2207 se rigen a la normativa Euro II que considera únicamente niveles de opacidad, por lo que en el país no existe un control en las emisiones de óxidos nitrosos al medio ambiente.

Investigaciones previas en el sistema EGR se han realizado en la Universidad Politécnica Salesiana tales como: “Estudio de los efectos de la EGR sobre la combustión, de un motor de encendido por compresión CRDi Hyundai Santa Fe 2.0, mediante el análisis de vibraciones” la cual está enfocada en la influencia de la recirculación de los gases de escape sobre la combustión mediante la medición de partículas y análisis de vibraciones; así como la investigación “Estudio de los efectos de la apertura de la válvula EGR en la combustión de un motor de encendido por compresión CRDi, mediante el uso de termografía infrarroja” el cual muestra los efectos de la apertura de la válvula en un motor CRDi de encendido por compresión por medio de imágenes termo gráficas en diferentes estados del motor ya sea cuando este se encuentra en un estado óptimo de funcionamiento así como en un estado simulado en el cual la válvula EGR es comandada y el área de escape este parcialmente restringida.

2.2. Importancia y alcance.

El presente proyecto toma importancia en el cuidado del medio ambiente, al considerar la implementación de un control difuso de la válvula EGR, que tiene como finalidad reducir las emisiones de óxidos nitrosos de los motores Diésel.

Además, este proyecto determinara la factibilidad e importancia de aplicar lógica difusa en el control de la válvula EGR en base a los resultados que se obtengan en la aplicación experimental de este control difuso en un motor Diésel.

El presente proyecto está dirigido a la línea de eficiencia energética y contaminación ambiental del Grupo de Investigación de Ingeniería de Transporte GIIT de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

Sera un aporte para el grupo de estudiantes de la carrea de Ingeniería Mecánica Automotriz que cursen cátedras referentes al estudio de motores de combustión interna.

El alcance de este proyecto es controlar el funcionamiento del sistema EGR de un motor de encendido por compresión Hyundai Santa Fe CRDi, mediante la variación en la activación del solenoide de dicho sistema con el uso de lógica difusa aplicado a través de un software de programación, este controlador recibirá información de todos los sensores implicados en el funcionamiento del sistema EGR para procesarlos y según sea el estado de funcionamiento en el que se encuentre el motor variar los pulsos de activación del solenoide, todo esto con el fin de reducir las emisiones de óxidos nitrosos del motor seleccionado sin afectar de manera considerable su funcionamiento y desarrollo.

2.3. Delimitación.

La lógica difusa desarrollada mediante un software para el control del solenoide de la válvula EGR será utilizada para realizar pruebas en un motor HYUNDAI SANTA FE 2.0 CRDI, para un previo estudio y análisis en la variación de sus emisiones de óxidos nitrosos.

En cuanto a la aplicación del programa de lógica difusa el proyecto culmina con el montaje y funcionamiento del nuevo sistema de control en un motor a prueba HYUNDAI SANTA FE 2.0 CRDI, utilizando un cableado desde los sensores a la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) la cual estará conectada al ordenador y un cableado desde la tarjeta (DAQ) al solenoide de la válvula EGR para recibir las señales de su control respectivo.

El presente proyecto se realizó en el taller automotriz de la carrera Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, con un tiempo de duración de cuatro meses y trece días, iniciando el 19 de septiembre del 2016 y culminando el 1 de febrero del año 2017.

3. OBJETIVOS.

3.1. Objetivo general.

- Estudiar los efectos en las emisiones de Óxidos Nitrosos, de un motor CRDI HYUNDAI SANTA FE 2.0, mediante el control difuso de la válvula EGR”.

3.2. Objetivos específicos.

- Obtener datos y valores del motor CRDI HYUNDAI SANTA FE 2.0 en referencia a emisiones de escape.
- Realizar la clasificación de los sensores que gestionan el funcionamiento de la válvula EGR.
- Diseñar e implementar un sistema de control difuso para la válvula EGR.
- Analizar y validar los resultados obtenidos con el sistema de control por lógica difusa.
- Elaborar una base de datos de la variación de NOx con los datos finales obtenidos.

4. REVISIÓN DE LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS O ESTADO DEL ARTE.

4.1. El Motor Diésel.

El motor diésel es un motor de combustión interna alternativo de encendido por compresión. La combustión de la mezcla se inicia por el autoencendido del combustible que tras ser inyectado en la cámara de combustión al final de la fase de compresión se ha evaporado y mezclado con el aire [4].

Los motores diésel son los motores de combustión interna alternativos más eficientes, pudiendo sobrepasar un rendimiento del 50% en el caso de los grandes motores lentos.

El menor consumo de combustible tiene como resultado un menor nivel de contaminación, esto destaca la importancia del motor diésel [4].

Pueden ser diseñados para trabajar con un ciclo de 2 o de 4 tiempos dependiendo de su aplicación. En la automoción casi siempre se usa el de 4 tiempos; las principales aplicaciones del de 2 tiempos son en el campo naval y el ferroviario, y en los motores estacionarios para la generación de energía eléctrica. El mayor motor de combustión interna alternativo existente es un motor diésel de 2 tiempos sobrealimentado de 14 cilindros con una potencia que supera los 80 MW y un rendimiento superior al 50% como es el caso del motor diésel marino Wärtsilä RT-flex 96C [4].

4.2. El Sistema Common Rail Direct Injection (CRDI).

El sistema de common rail o conducto común es un sistema de inyección de combustible electrónico para motores diésel de inyección directa en el que el gasóleo es aspirado directamente del depósito de combustible a una bomba de alta presión y ésta a su vez lo envía a un conducto común para todos los inyectores y por alta presión al cilindro [5].

La idea esencial que rige el diseño es lograr una pulverización mucho mayor que la obtenida en los sistemas de bombas de inyección mecánicas, para optimizar el proceso de inflamación espontánea de la mezcla que se forma en la cámara al inyectar el gasoil, lo que constituye el principio básico del ciclo diésel. Para ello se recurre a hacer unos orificios mucho más pequeños, dispuestos radialmente en la punta del inyector (tobera), compensando esta pequeña sección de paso con una presión mucho mayor (alrededor de 2000 Bar) [5].

El sistema Common Rail consta principalmente de una bomba de suministro, la rampa, los inyectores y la ECU del motor, los cuales se explican a continuación [6]:

- Sensores: detectan las condiciones del motor y de conducción, y las convierten en señales eléctricas.
- ECU del motor: efectúa cálculos basados en las señales eléctricas emitidas por los sensores y los envía a los actuadores para alcanzar el estado ideal.

- Actuadores: funcionan de acuerdo con las señales emitidas por la ECU. El control del sistema se realiza mediante el control electrónico de los actuadores. La cantidad y el calado de inyección se determinan mediante el control de la duración y el momento en el que se aplica la corriente a la TWV (válvula de dos vías) en el inyector. La presión de inyección se determina mediante el control de la SCV (válvula de control de succión) en la bomba de suministro.

En comparación con los sistemas propulsados por levas (bombas rotativas) el sistema common rail ofrece una mayor flexibilidad para la adaptación del sistema de inyección al funcionamiento del motor debido a que en la inyección de acumulador (common rail) se realiza por separado la generación de presión e inyección. La presión de inyección se genera independientemente del régimen del motor y del caudal de inyección y esta a disposición en el Rail (acumulador de combustible) para la inyección. El momento y el caudal de inyección se calculan en la unidad de control electrónica y se realiza por el inyector (unidad de inyección) en cada cilindro del motor, mediante el control de una electroválvula [7].

4.3. Recirculación de los gases de escape.

La recirculación de los gases de escape puede definirse como una técnica de reducción de emisiones de NOx en motores de combustión interna alternativos mediante la cual se introducen en el cilindro parte de los gases procedentes de combustiones anteriores. Puesto que el gas quemado contiene un elevado porcentaje de CO₂ y de agua, esta técnica contribuye a incrementar la proporción de gases inertes en el cilindro. Los gases inertes provenientes de la recirculación de gases de escape no participan en la combustión, pero permiten reducir la temperatura local en el cilindro. Puesto que el calor específico del gas recirculado es superior al del aire, la recirculación de gases de escape contribuye a reducir la temperatura de la llama. Por otro lado, la introducción de un gas inerte en el cilindro disminuye a su vez la concentración de oxígeno en el interior del mismo. Bajo estas condiciones, la combustión se realiza de una forma más lenta,

disminuyendo el pico de presión y temperatura de la combustión, y reduciendo así las emisiones de NOx [6].

4.3.1. Sistema EGR (Recirculación de Gases de Escape).

El sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation) se basa en reenviar una parte de los gases de escape al colector de admisión, para reducir el contenido de oxígeno en el aire de admisión esto provoca un descenso en la temperatura de combustión que reduce las emisiones de óxido de nitrógeno (NO) [28].

Existen tres justificaciones para el efecto EGR sobre la reducción de NOx las cuales son, incremento del retraso al encendido, incremento de la capacidad de calor y la inhibición de la carga de gases inertes, estas hipótesis se explican a continuación [7]:

- La hipótesis de retraso de encendido, sostiene que la recirculación de gases de escape causa un incremento en el retraso de encendido, esto tiene el mismo efecto como retardar el tiempo de inyección.
- La hipótesis de la capacidad de calor condiciona que la adición de los gases inertes del escape dentro de la admisión, incrementan la capacidad de calor (calor específico), del fluido que está presente y que no reacciona durante la combustión. El incrementar la capacidad de calor tiene como efecto el disminuir la temperatura pico de la combustión.
- Según la teoría de la inhibición, el efecto de la recirculación de los gases de escape sobre el NOx, es causado por incrementar la cantidad de gases inertes en la mezcla, lo cual reduce la temperatura de la llama adiabática del ciclo.

Un sistema de recirculación de gases de escape está activado en una carga parcial y temperatura normal del motor, este sistema está compuesto por los siguientes elementos:

- Medidor de masa de aire.
- Sensor de revoluciones (RPM).

- Sensor de temperatura.
- Convertidor EGR (Electroválvula de control de vacío).
- Válvula EGR

Con respecto a este sistema se presentan las siguientes desventajas:

- Incremento en las emisiones de hollín.
- Introducción de material articulado dentro de los cilindros del motor.

Siendo una de las principales soluciones a los problemas presentados el acoplar trampas de partículas y controles de humo lo cual da como resultado una alta colección-eficiencia en hidrocarburos no quemados y simultáneamente en las emisiones de NOx.

4.4. Sistemas de control EGR.

Dentro de los sistemas de control propuestos se tiene como ejemplo los siguientes sistemas:

- Control PI descentralizado del sensor MAP y el MAF medido, usando los sensores MAP y MAF para generar comandos de ciclo de trabajo para la EGR y VGT [25].
- Control PI descentralizado del sensor MAP y MAF estimado, usando el sensor MAP y sensor de presión del múltiple de escape para generar comandos de ciclo para la EGR y VGT [25].
- Rango de control de un PI de sensores MAP y MAF, usando los sensores MAP y MAF para generar comando de posición para la EGR y VGT [25].
- Control PI descentralizado del sensor MAP y una fracción de flujo de la EGR, usando el sensor MAP y un sensor EXMP para generar comando de ciclos de trabajo para la EGR y VGT [25].

4.5. Lógica difusa.

Básicamente la lógica difusa es una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas

formales para su tratamiento. Cualquier problema del mundo puede resolverse como dado un conjunto de variables de entrada (espacio de entrada), obtener un valor adecuado de variables de salida (espacio de salida). La lógica difusa permite establecer este mapeo de una forma adecuada, atendiendo a criterios de significado y no de precisión. [10]

El termino lógica difusa fue utilizado por primera vez en 1974. Actualmente se utiliza en un amplio sentido, agrupando la teoría de conjuntos difusos, reglas si-entonces, aritmética difusa, cuantificadores, etc [10].

La lógica difusa se basa en la relatividad de lo observado. Proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de una información de entrada ambigua. Se adapta mejor al mundo real en el que vivimos e incluso puede funcionar con nuestras expresiones, del tipo “hace mucho calor”, “no es muy alto”, “el ritmo del corazón es poco acelerado” etc. La clave de esta adaptación está en comprender los cuantificadores de nuestro lenguaje, por ejemplo “mucho”, “medio”, “bajo” y “muy bajo”. La lógica difusa puede entenderse como la posibilidad de asignar mas valores de verdad o falsedad a los resultados de “falso” y “verdadero”. El objetivo de todo sistema manejador de una lógica difusa es describir los grados de los enunciados de salida en términos de los de entrada [11].

4.5.1. Fusificación.

Fusificar es tomar una señal continua en la entrada (un valor numérico o señal de un sensor) y transformarla en un conjunto de valores entre 0 y 1 que indiquen el grado de pertenencia (función de membresía) en cada conjunto fuzzy establecido.

En este punto el estudio de la teoría de los conjuntos difusos toma importancia para poder establecer el diseño y la forma que van a tomar las variables de entrada y de salida del proceso [12].

4.5.2. Conjuntos difusos.

A partir de un concepto concreto sobre la teoría de conjuntos clásicos se puede hacer una extensión para representar la teoría de los conjuntos difusos.

Un conjunto clásico se define como una colección de elementos que existen dentro de un universo, cada uno de los elementos de del universo pertenece o no a un determinado conjunto. Por lo tanto, cada conjunto puede definirse completamente por una función de pertenencia, que opera sobre los elementos del universo, y que se le asigna el valor de 1 si el elemento pertenece a un conjunto y de 0 si no pertenece [13].

Ahora bien, un conjunto difuso se define de forma similar, con una diferencia conceptual importante: un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto [13]. De esta forma, un conjunto difuso que existe dentro del universo, se define como todos aquellos elementos que pueden ser calificados mediante una grado de pertenecía. Este grado de pertenecía se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que puede tomar la variable x , la función característica $\mu_A(x)$ proporciona el grado de pertenencia de ese valor x al conjunto difuso A , definido como la ecuación (1).

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\} \quad (1)$$

Donde U es el universo de discurso continuo (por ejemplo, todos los números reales: $U: R$) [14].

Por lo tanto las primeras diferencias claras entre estos los conjuntos clásicos y difusos son las siguientes:

- La función de pertenencia asociada a los conjuntos clásicos sólo pueden tener dos valores: 0 ó 1, mientras que en los conjuntos difusos pueden tener cualquier valor entre 0 y 1 [15].
- Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y simultáneamente pertenecer (parcialmente) al complemento de dicho conjunto. Lo anterior no es posible en los conjuntos clásicos, ya que constituiría una violación al principio del tercer excluido [15].

Visto desde esta perspectiva se puede considerar que la lógica clásica es un caso limite de la lógica difusa. Así pues los conjuntos difusos pueden ser considerados

como una generalización de los conjuntos clásicos, como se representa conceptualmente en la figura 1 [13].

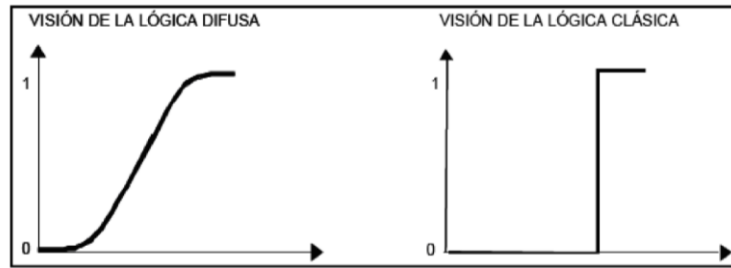


Figura 1. Lógica difusa vs lógica clásica. Fuente: [13].

Esta lógica permite tratar información imprecisa, como estatura alta, media o baja de una persona. Así, por ejemplo (Figura 2), un individuo es bajo si se tiene una estatura inferior a 1.60 metros, un individuo es mediano, si tiene una estatura superior a 1.60 metros e inferior a 1.80 metros y un individuo es alto, si tiene una estatura superior o igual a 1.80 metros, con lo que se lograría una clasificación en conjuntos clásicos. Sin embargo, qué tan grande es la diferencia que existe entre dos individuos, uno con estatura de 1.79 metros y otro de 1.80 metros; este centímetro de diferencia quizás no represente en la práctica algo significativo, y a pesar de eso los dos individuos han quedado rotulados con etiquetas distintas: uno es mediano y el otro es alto. Si se optase por efectuar la misma clasificación con conjuntos difusos estos cambios abruptos se evitarían, debido a que las fronteras entre los conjuntos permitirían cambios graduales en la clasificación [13].

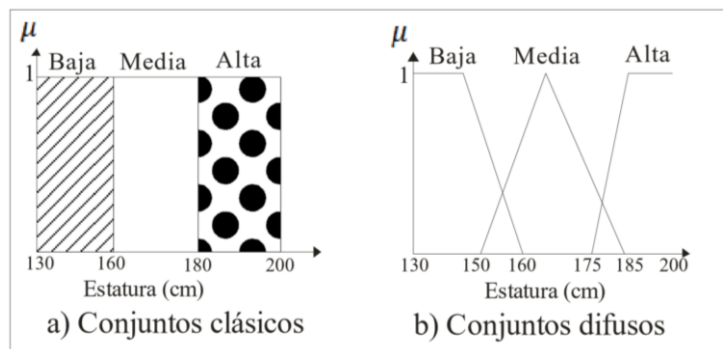


Figura 2. Conjuntos difusos para la variable estatura de una persona [13].

4.5.3. Funciones de membrecía.

Según lo expuesto en el punto anterior se sabe que la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto. Este grado de pertenencia se define mediante una función característica asociada al conjunto difuso, llamada función de membrecía o pertenencia. Así, si se define un conjunto difuso “A” con “n” elementos: la función de membrecía quedaría definida por $\mu_A(x)$, donde cada valor que pueda tomar un elemento o variable de x , la función de membrecía $\mu_A(x)$ proporciona el grado de pertenencia de este valor de x al conjunto difuso. La única condición que deben cumplir es que " $\mu_A(x) \in [0,1]$ " [16].

Muchos conceptos de teoría clásica de conjuntos se pueden hacer extensivos a los conjuntos difusos, otros son exclusivos e inherentes a la teoría de conjuntos difusos. Entre los conceptos más utilizados se tiene:

- El soporte de un conjunto difuso A en el universo de discurso U es un conjunto “crisp” (numérico) que contiene todos los elementos de U que tienen el valor de pertenencia mayor a cero en A , esto se definido en la ecuación (2).

$$\text{sop}(x) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \quad (2)$$

Si el soporte de un conjunto difuso no contiene ningún elemento, se tiene un conjunto difuso vacío. Si el soporte de un conjunto difuso es solo un punto, se conoce como “singleton” difuso.

- El punto de cruce de un conjunto difuso, es el punto donde $\mu_A(x) = 0.5$.
- Dos conjuntos difusos A y B son iguales si y solo si sus funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ son iguales.

La forma de función de membrecía utilizada, depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y varía en la experiencia del usuario. Existen varios tipos de funciones de membrecía como: singleton, triangular, trapezoidal, pi, monotónica, S, gama, gaussiana o forma de campana, y sigmoideal, pero la más

utilizadas por su simplicidad matemática son: triangular, forma de campana, monotonica, como se muestra en la figura (3) [11].

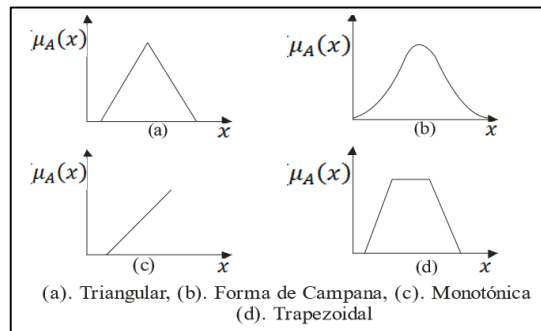


Figura 3. Formas de funciones típicas de membresía. Fuente: [17].

El número de funciones de membresía depende del diseñador. A mayor número de funciones tendremos mayor resolución, pero también mayor complejidad computacional, por lo que recomienda un número impar, 3 a 7, con un solapamiento del 20% al 50% [11].

4.5.4. Desfusificación.

Desfusificar es realizar la función contraria al bloque de fusificación, ya que este bloque desfusificador tiene como entradas conjuntos difusos de salida del bloque de inferencia y como salida valores concretos de variables que se asignaran al o a los actuadores [12].

Los 3 métodos más utilizados para un proceso de desfusificación son:

- El método del punto máximo.
- El método del centro de área.
- El método del centro de gravedad.

4.5.4.1. Punto máximo.

Este método considera únicamente la acción de control sugerida por la regla cuya conclusión fue evaluada con el valor de verdad más alto. El punto de desfusificación encontrado por este método es el que se encuentra el punto en donde la salida difusa final alcanza su valor máximo por primera vez, en el sentido de los valores crecientes del eje horizontal. Este método elige como valor

para la variable de salida la función de membresía máxima. En general no es un método óptico, ya que el valor máximo puede ser alcanzado por varias salidas [12].

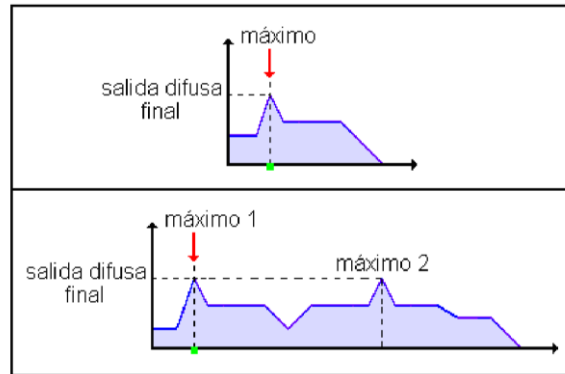


Figura 4. Punto máximo. Fuente: [12].

4.5.4.2. Centro de área.

Este método es sensible al resultado de todas reglas al momento de hacer la defusificación, lo que produce una salida de control más suave.

Asumiendo que se produce una acción de control con una función de membresía dada por μ_c . Este método calcula el centro de área de la distribución por la acción de control. Asumiendo un universo de discurso discreto. Este método asigna el centro de área de la salida difusa final al valor defusificado. El centro de área también es llamado centroide [12].

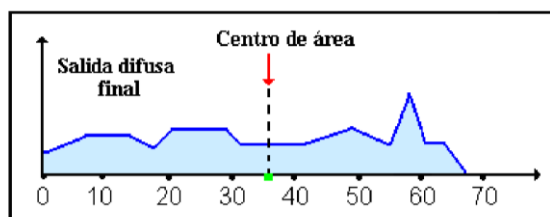


Figura 5. Centro de área. Fuente: [12].

4.5.4.3. Centro de gravedad.

Utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función característica de salida. Es el método más utilizado en aplicaciones de la lógica difusa a la

ingeniería, ya que se obtiene una solución única, aun que muchas de las veces es complicado calcular matemáticamente. [12].

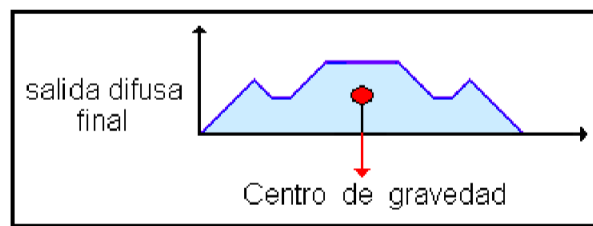


Figura 6. Centro de gravedad. Fuente: [12].

4.5.5. Aplicaciones.

Desde mediados de los años 70, la lógica difusa se ha utilizado ampliamente debido a varios factores. Uno de ellos es que el uso de conocimiento experto permite la automatización de tareas. En muchas tareas de aplicación se reduce considerablemente la necesidad de operadores que basan su conocimiento en la experiencia (y que difícilmente podría ser expresado con ecuaciones diferenciales). De este modo, si existe un conocimiento del proceso, es posible modelarlo mediante lógica difusa [10].

Los sistemas basados en lógica difusa son fáciles de diseñar, modificar y mantener. Pese a la pérdida de precisión, la reducción de tiempo de desarrollo y mantenimiento es muy relevante para uso industrial [10].

Otro factor a tomar en cuenta es que el control difuso permite diseñar soluciones de alta calidad que eviten las patentes existentes en otros sistemas de control. En Japón este tipo de controladores se asocia a modernidad, alta calidad y tecnológicamente potente. En Europa sin embargo se trata de ocultar el término “difuso” por su significado negativo. En la actualidad multitud de productos de electrónica de consumo emplean lógica difusa [10].

4.5.6. Aplicaciones en el ámbito automotriz.

En el ámbito automotriz Mitsubishi y General Motors emplean sistemas de transmisión automática y control de temperatura basados en lógica difusa, así como también la aplicación de lógica difusa empleado por investigadores para el

control de consumo de combustible, reducción de emisiones contaminantes, control de sistemas de luces, etc [10].

Otro caso de éxito es el metro de Sendai (Japón) que cuenta con 16 estaciones. El sistema de control difuso está dividido en dos módulos, uno para el control de velocidad y otro para la parada automática. Este controlador difuso ofrece importantes ventajas sobre los controladores convencionales, como en el mayor confort en el viaje para pasajeros y menor consumo de energía [10].

4.6. Software de programación MATLAB.

MATLAB (Matrix Laboratory) es un programa interactivo de uso general. Es un instrumento computacional, simple, versátil y de gran poder para aplicaciones numéricas, simbólicas y gráficas y contiene una gran cantidad de funciones predefinidas para aplicaciones en ciencias de la ingeniería [18].

La interacción se realiza mediante instrucciones (denominadas comandos), también mediante funciones y programas en un lenguaje estructurado. Los objetos básicos con los cuales opera MATLAB son matrices. La asignación de memoria a cada variable la realiza MATLAB en forma dinámica y eficiente, por lo que no son necesarias las declaraciones de variables antes de su uso [18].

4.7. Software de programación LabView.

LabVIEW es un software que proporciona un potente entorno de desarrollo gráfico para el diseño de aplicaciones de Ingeniería de adquisición de datos, análisis de medidas y presentación de datos gracias a un lenguaje de programación sin la complejidad de otras herramientas de desarrollo [19].

El uso de Labview es de gran ayuda para el diseño de sistemas de adquisición, análisis y control de datos, permitiendo así realizar una interfaz entre el sistema a trabajar y el ordenador (PC) mediante un puerto USB, ya que permiten el control y monitoreo de datos en aplicaciones que se desean estudiar en tiempos reales de funcionamiento como: temperaturas, presiones de aire, torque, pulsos de sensores del tipo hall, control de servomotores, entre otros [20].

4.8. Tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6212.

El NI USB-6212 (Figura 7) es un módulo DAQ multifunción USB de la Serie M energizado por bus y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Cuenta con 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de 400 kS/s, dos salidas analógicas, 32 líneas de E/S digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores. El USB-6212 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje; y la conectividad directa con terminal de tornillo mantiene y simplifica las conexiones de señal [21].



Figura 7. Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6212. Fuente: [21]

4.9. Analizador de gases MAHA MGT 5.

Equipo compacto e independiente apto para el empleo estacionario o móvil, el cual se basa en la concepción del opacímetro modelo MDO2LON, dando la posibilidad de una combinación multifuncional para análisis en los gases de escape de motores de gasolina así como de motores diésel (Figura 8). Los valores obtenidos se pueden visualizar en un sencillo e independiente aparato móvil con LED y terminal de mano [22].



Figura 8. Analizador de gases MAHA MGT 5. Fuente: [22].

5. MARCO METODOLÓGICO.

5.1. Estado general del banco didáctico CRDi Diésel.

5.1.1. Descripción.

El banco didáctico utilizado para la presente investigación es un motor CRDi diésel de la marca Coreana Dae Sung, este banco integra un motor Hyundai Santa Fe 2.0.

5.1.2. Especificaciones técnicas banco didáctico CRDi Diésel.

En la tabla 1 se presentan las características generales del banco didáctico del motor Hyundai Santa Fe CRDi 2.0, sus características principales se pueden encontrar en el Anexo 1.

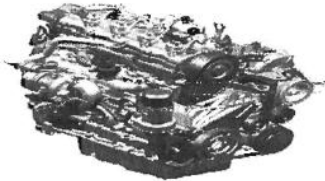
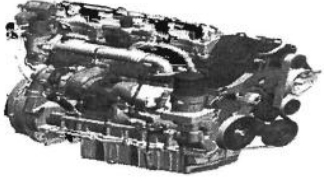
Tabla 1. Tabla de especificaciones técnicas banco didáctico CRDi Diésel. Fuente: [26].

Nombre del equipo.	del CRDI Diesel ENG, A/T, Control System Educational Training Equipment
Modelo No.	G – 120212
Dimensiones	250x80x180 cm (LxWxH)
Peso	250 kg
Alimentación	220 V 60 HZ

5.1.3. Especificaciones técnicas motor Hyundai Santa Fe 2.0

Los siguientes datos fueron tomados del manual de entrenamiento en motores Hyundai CRDi 2.0 y se puede ver en la tabla (1).

Tabla 2. Tabla de especificaciones técnicas (Motor Hyundai 2.0 CRDi). Fuente: [10]

Motor	FO D-2.0 CRDi	JM D-2.0 CRDi
Apariencia.		
Cilindrada	1991 cc	1991 cc
PS o HP	110.5 PS/4000rpm	136 PS/4000rpm
Torque	26.0 kg.m/2000rpm	31.1 kg.m/2000rpm
Diámetro del cilindro x carrera	83x92	83x92
Características	BOSCH 1era Generación.	BOSCH 2da Generación.
	<ul style="list-style-type: none"> -Control de presión de combustible. - Control de salida. - 1,350 bar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control de presión de combustible. -Control de entrada y salida. • SCV (Swirl Control Valve)- • ACV (Air Control Valve). • CPF – Euro IV.

5.2. Sistema EGR de un motor HYUNDAI SANTA FE CRDi 2.0.

Este motor está equipado con un sistema EGR, en el cual algunos gases de escape serán introducidos en el sistema de admisión del motor. Al llegar a cierto nivel, el incremento del resto de gases de escape será positivamente efectivo para la transferencia de energía y la descarga de gases de escape. El solenoide de la válvula EGR es controlado por una señal PWM producida por la ECM, como se muestra en la figura 9 [10].

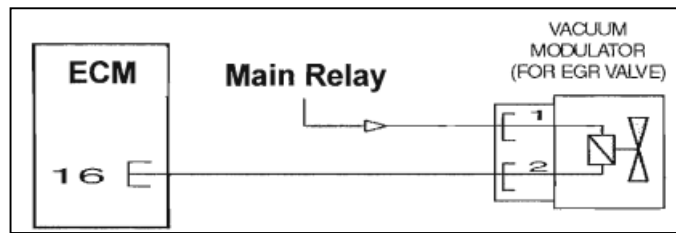


Figura 9. Sistema EGR (Motor Hyundai CRDI 2.0). Fuente: [10].

5.2.1. EGR Cooler.

El objetivo principal del enfriador EGR (Figura 10) es reducir la temperatura de emisión de EGR y promover la eficiencia de volumen cuando la EGR está trabajando [10].

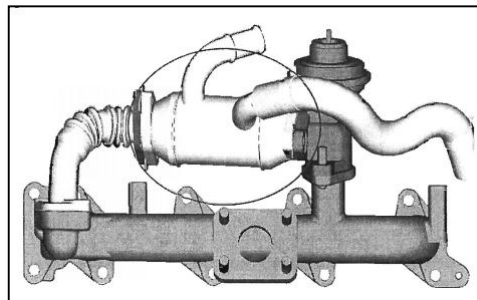


Figura 10. Sistema de enfriamiento EGR (Motor Hyundai CRDI 2.0). Fuente: [10].

5.2.2. Concepto general del sistema EGR en un motor Hyundai CRDI 2.0.

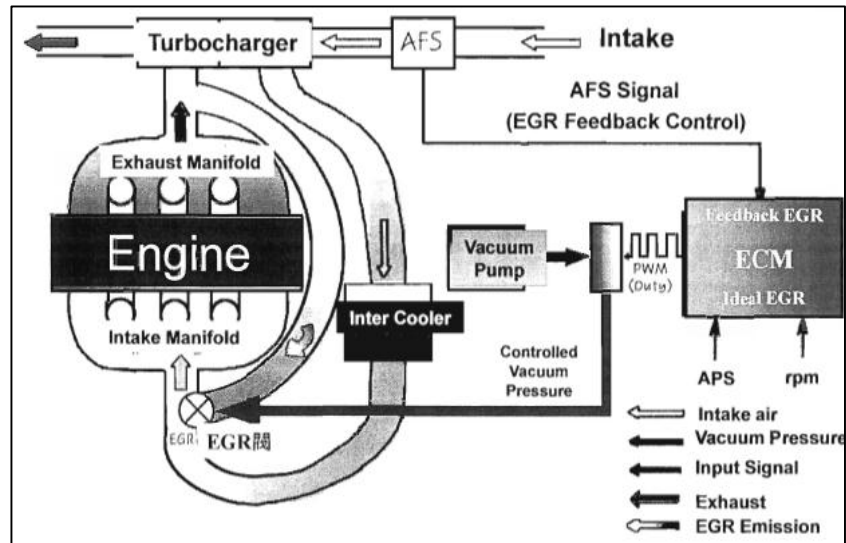


Figura 11. Concepto general del sistema EGR (Motor Hyundai CRDI 2.0), Fuente: [10].

La figura 11 muestra el concepto general de funcionamiento del sistema EGR en un motor Hyundai Santa Fe 2.0 CRDi, en el cual se definen las tres señales de entrada (APS, RPM, AFS) que la ECU del motor considera para dar una salida variable de pulsos PWM hacia el solenoide de la bomba de vacío para que a través de esta establecer un control de la presión de vacío, dicha presión será la encargada de abrir o cerrar la válvula EGR, esta válvula permite o no la recirculación de gases de escape hacia la cámara de combustión. El sistema de control que emplea el sistema EGR en este motor se muestra en la figura 12, el cual es un sistema de control de lazo abierto ya que el motor no cuenta con sensor NOX que retroalimente el control que da la ECU.

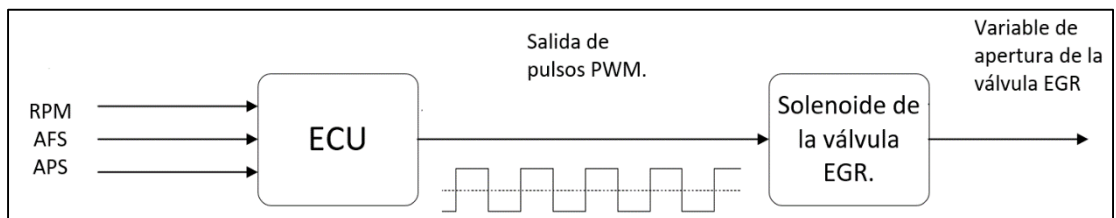


Figura 12. Sistema de control lazo abierto para la EGR. Fuente: Autores.

5.2.3. Parámetros de funcionamiento del sistema EGR.

El sistema EGR del motor HYUNDAI SANTA FE CRDi 2.0 funciona bajo los siguientes parámetros [10]:

- La velocidad del motor entre 1100 – 3000 rpm.
- Temperatura del refrigerante: $ECT < 60^{\circ}\text{C}$.
- Presión atmosférica: altitud superior a 1700 msm.
- El sensor de flujo de aire (AFS) no debe presentar mal funcionamiento.
- La cantidad de inyección debe ser menor que 14 c.c.
- El sistema EGR se encuentra apagado durante un régimen normal de ralentí, en el instante que se deja libre el pedal del acelerador el sistema EGR operara durante 50 segundos (Figura 13).

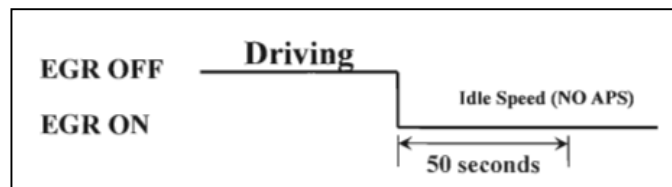


Figura 13: Funcionamiento del sistema EGR sin señal del APS. Fuente:[10]

5.3. Clasificación de sensores.

Los sensores que se involucran en los parámetros de funcionamiento del sistema EGR explicados en el punto 5.2.3 son:

- Sensor CKP
- Sensor ECT.
- Sensor AFS.
- Sensor APS.

Por lo que del grupo de 4 sensores únicamente se toman cuenta 3 (CKP, AFS, APS) debido son los sensores que aportan de manera significativa al sistema y a que la señal de temperatura dada por el sensor ECT el sistema no la toma en cuenta en sus variables de entrada como se visualiza en la figura 11 del inciso 5.2.2, ya a que los valores de temperatura no dan cambios dinámicos que influyeran en el diseño del sistema difuso.

A continuación se presenta el funcionamiento de cada uno de los sensores así como la designación de los pines y color de cables al que corresponde cada uno, dicha información se utilizó para realizar las conexiones correctas en las diferentes adquisiciones de señales de cada sensor.

5.3.1. Sensor de posición del cigüeñal (CKP).

El sensor de posición del cigüeñal es llamado CKP técnicamente. Su operación es detectar y calcular los dientes (60-2) en el engranaje mediante pulsos, envía la información de cada pistón en la cámara de combustión a la ECM, y decide el actual tiempo de inyección. Esta importante información es calculada en la ECM mediante el uso del sensor CKP [23]. El sensor CKP dispone de 3 pines de conexión a la ECM uno de masa y dos de señal (Figura 14), la tabla 3 indica el color de cable para cada pin, así como la figura 15 la ubicación del sensor en el motor.

Tabla 3. Pines del sensor CKP (Hyundai Santa Fe 2.0).

Numero de pin.	Color
1	Negro
2	Negro
3	Rojo

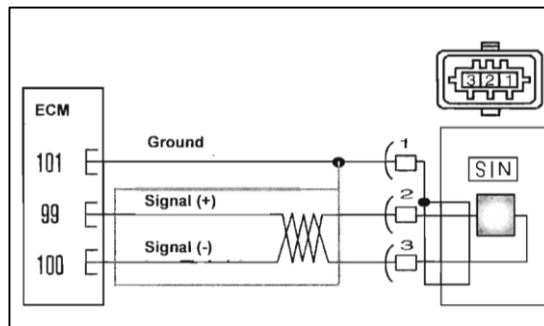


Figura 14. Esquema eléctrico del sensor CKP (Motor Hyundai CRDI 2.0), Fuente: [23].



Figura 15. Ubicación del sensor CKP en el banco didáctico CRDi Diésel. Fuente: Autores

5.3.2. Sensor de posición del acelerador (APS).

El sensor de posición del acelerador es usado para detectar la aceleración o desaceleración del conductor, y envía la señal a la ECM. La ECM decide la cantidad de inyección y el tiempo apropiado según esta señal. Este sensor cuenta con dos sensores, APS 1 y APS 2. APS 1 es el sensor principal en enviar información a la ECM acerca del movimiento del conductor. APS 2 es el sub sensor que monitorea el mal funcionamiento o no del APS 1. El valor de salida del APS 2 es la mitad del APS1 [23]. El sensor APS dispone de 6 pines de conexión a la ECM dos de masa y dos de señal (Figura 16), la tabla 4 indica el color de cable para cada pin, así como la figura 17 la ubicación del sensor en el motor.

Tabla 4. Pines del sensor APS (Motor Hyundai Santa Fe 2.0).

Numero de pin.	Color
1	Verde
2	Café
3	Rojo
4	Amarillo
5	Verde/Negro
6	Rosado

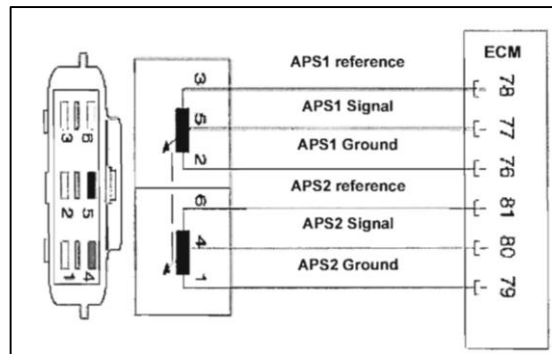


Figura 16. Esquema eléctrico del sensor APS (Motor Hyundai CRDI 2.0), Fuente: [10].



Figura 17. Ubicación del APS en el banco didáctico CRDi Diésel. Fuente: Autores.

5.3.3. Sensor de flujo de masa de aire del tipo película de calor (AFS).

El principio del sensor de película caliente es calentar el sensor y transferir la masa de aire. Comparado con un motor a gasolina, el sensor de flujo másico de aire de un motor diésel es principalmente el límite de la EGR. La temperatura del aire de admisión está incorporado en este sensor [23].

Funciones:

- Control de retroalimentación del sistema EGR.
- Corrección de la cantidad de combustible cuando se de una repentina aceleración y desaceleración.

El sensor AFS dispone de 5 pines de conexión a la ECM uno de masa, uno de voltaje de alimentación (12V) y uno de señal AFS (Figura 18), la tabla 5 indica el color de cable para cada pin, así como la figura 19 la ubicación del sensor en el motor.

Tabla 5. Pines del sensor AFS (Motor Hyundai Santa Fe 2.0).

Numero de pin.	Color
1	Azul
2	Verde 2
3	Negro/Café
4	Rosado
5	Verde 1

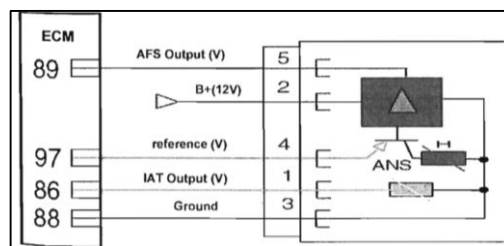


Figura 18. Numero de pin sensor AFS (Motor Hyundai CRDI 2.0), Fuente: [23].

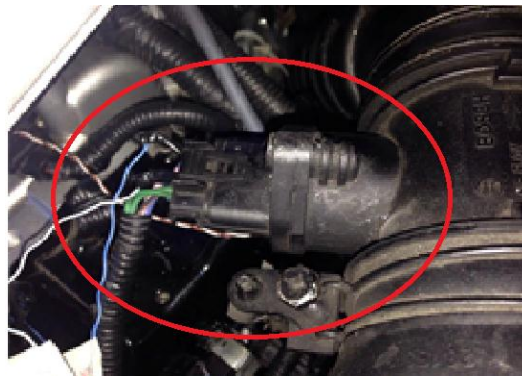


Figura 19. Ubicación del AFS en el banco didáctico. Fuente: Autores.

5.4. Adquisición y clasificación de señales.

Una vez establecidos los pines de conexión de los sensores especificados en el apartado 5.4, se procede a realizar las conexiones desde los pines de señal o señales de salida y tierra, a los pines de entrada de datos de la tarjeta DAQ NI USB 6212.

5.4.1. Configuración de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212.

La configuración de las entradas de señales de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212 se realiza mediante el software de programación de instrumentación virtual LabView, ya que en el mismo se visualizan las señales obtenidas y al mismo tiempo son guardadas en el ordenador para su posterior análisis y clasificación.

Por lo tanto para su respectiva configuración se realizan los siguientes pasos:

1. Abrir LabView, seleccionar *Blank VI* (Figura 20).

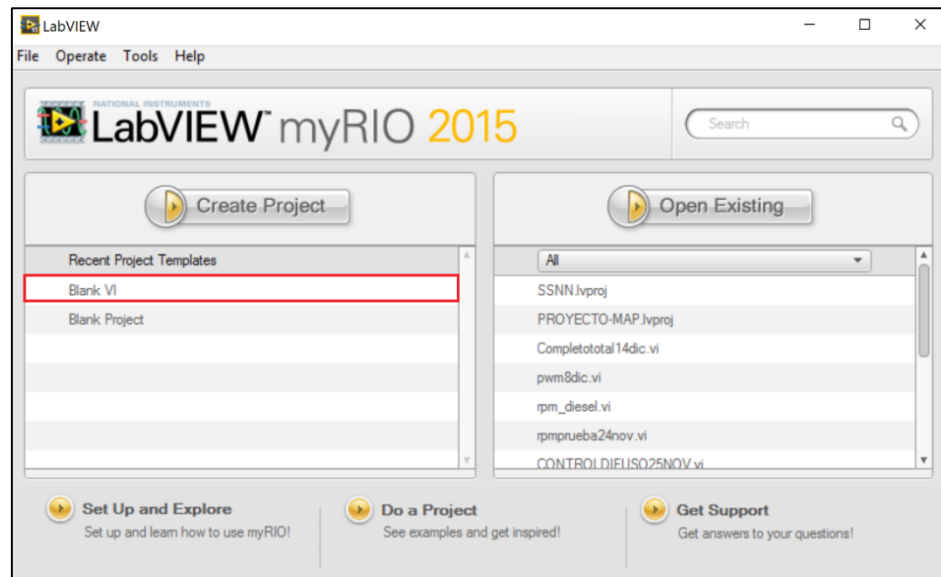


Figura 20. Configuración DAQ NI USB 6212 (New VI). Fuente: Autores.

2. En la pantalla *Block Diagram*: *Clic derecho* > *Express* > *Input* > *DAQ Assist* (Figura 21).

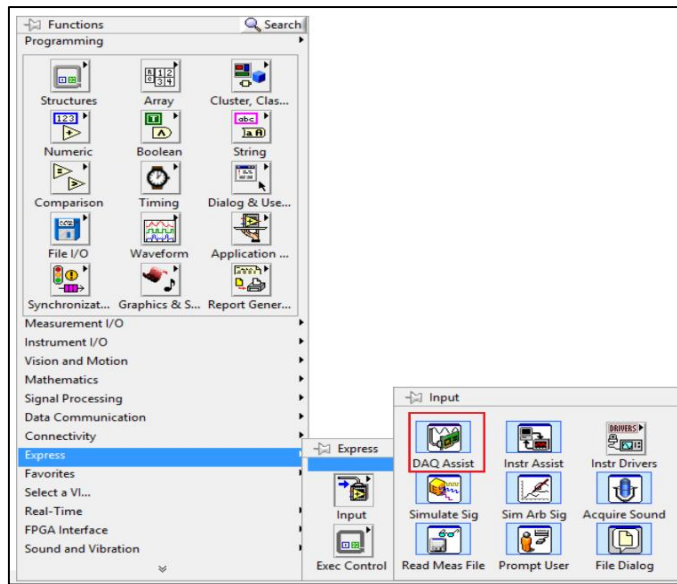


Figura 21. Configuración DAQ NI USB 6212 (DAQ Assist). Fuente: Autores.

3. En el panel de DAQ Assist: *Acquire Signals*>*Analog Input*>*Voltage* (Figura 22).

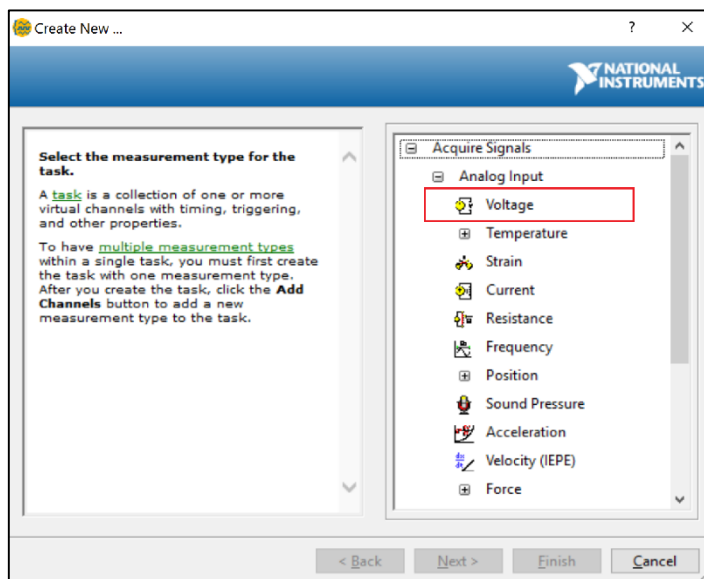


Figura 22. Configuración DAQ, NI USB 6212 (Analog Input). Fuente: Autores.

4. En *Voltage*: se seleccionan los puertos de entrada de acuerdo al número de señales a obtener, en este caso 4 (Figura 23).

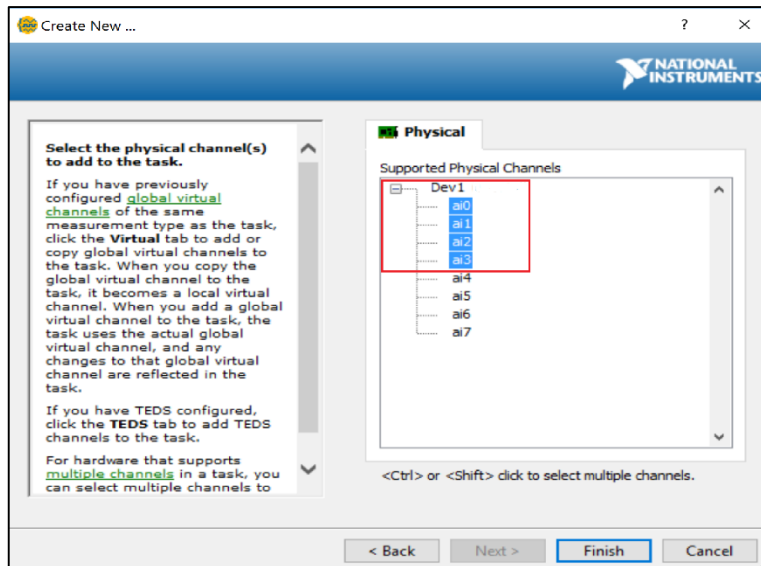


Figura 23. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Analog Input). Fuente: Autores

- Una vez establecidas las entradas, clic *Finish*, se obtiene automáticamente una nueva ventana en la cual se configura los nombres de cada entrada (CKP, AFS, APS, EGR), *clic derecho en cada entrada>rename>New name: especificar cada nombre* (Figura 24).

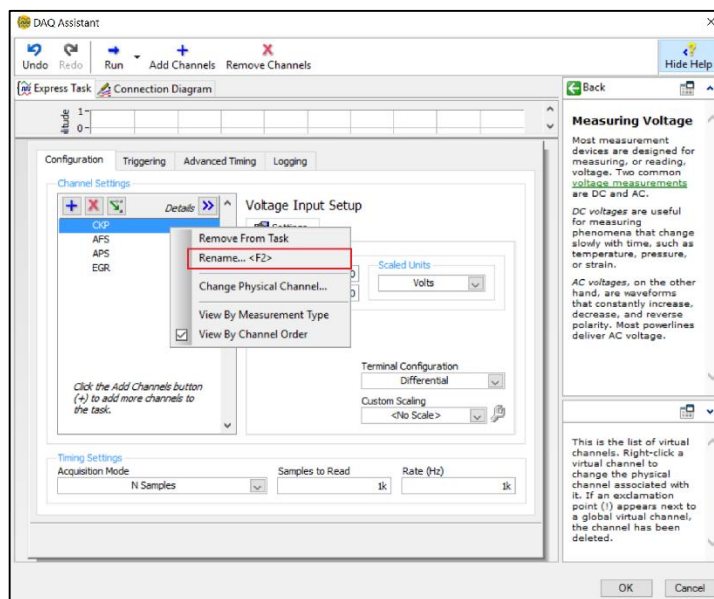


Figura 24. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Rename Input). Fuente: Autores

- Para las entradas AFS y APS se realiza la siguiente configuración: *Signal Input Range >Min: 0> Max:5; Scaled Units> Volts; Terminal configuración>RSE* (Figura 25). Para la entrada EGR: *Signal Input Range >Min: 0> Max:10; Scaled Units> Volts; Terminal configuración>RSE*

(Figura 26), y finalmente para la entrada CKP: *Signal Input Range* >Min: -5> Max:5; *Scaled Units*> Volts; *Terminal configuración*> Differential (Figura 27).

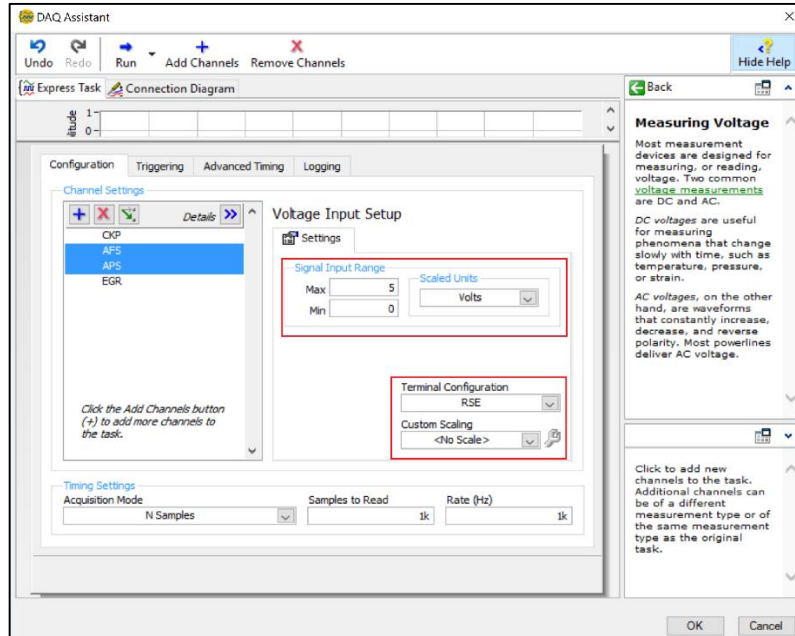


Figura 25. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Configuración AFS-APS). Fuente: Autores.

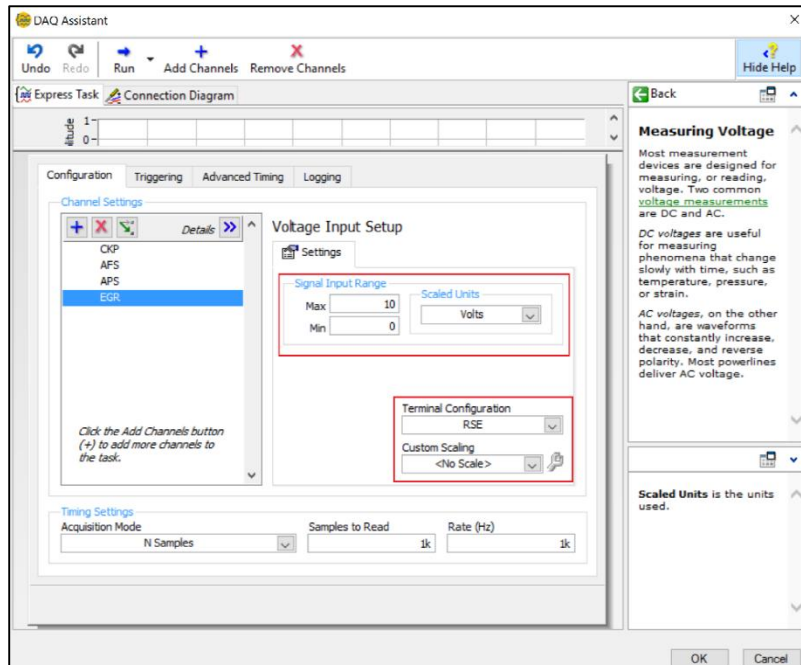


Figura 26. Configuración DAQ. NI USB 6212 (Configuración EGR). Fuente: Autores.

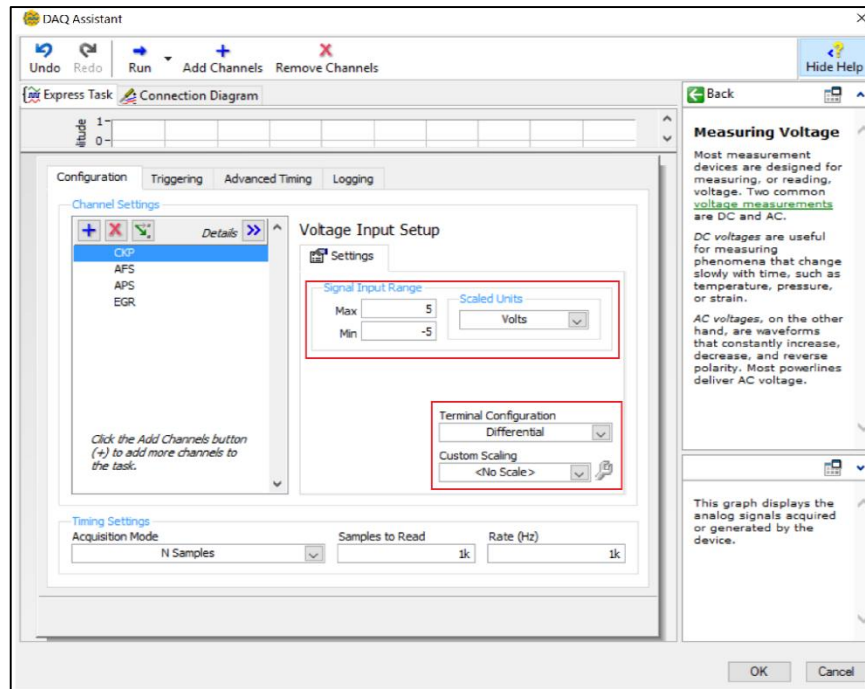


Figura 27. Configuración DAQ NI USB 6212 (Configuración EGR). Fuente: Autores

7. Para la configuración de tiempo (*Timing Settings*), se considera lo siguiente:

- Máximo de revoluciones del motor: 3500rpm.

$$\frac{4000rpm}{60s} = 66.66 rps$$

- Numero de dientes de la rueda fónica: 60 dientes. Por lo tanto se tiene 60 pulsos por segundo en una vuelta del cigüeñal. Por lo tanto:

$$66,66 rps * 60 dientes = 4000 Hz.$$

- Según el criterio de Nyquist:

$$Frecuencia\ de\ muestreo = 2 *$$

$$frecuencia\ de\ la\ señal.$$

$$Frecuencia\ de\ muestreo = 2 * 4000 = 8000 Hz.$$

Por lo que se designa una frecuencia de adquisición de datos de 10KS/s, para cada una de las señales.

Por lo tanto finalmente se configura: *Timing Settings*> *Acquisition Mode*> *N Samples*; *Samples to read*>10k; *Rate (Hz)*>10k (Figura 28).

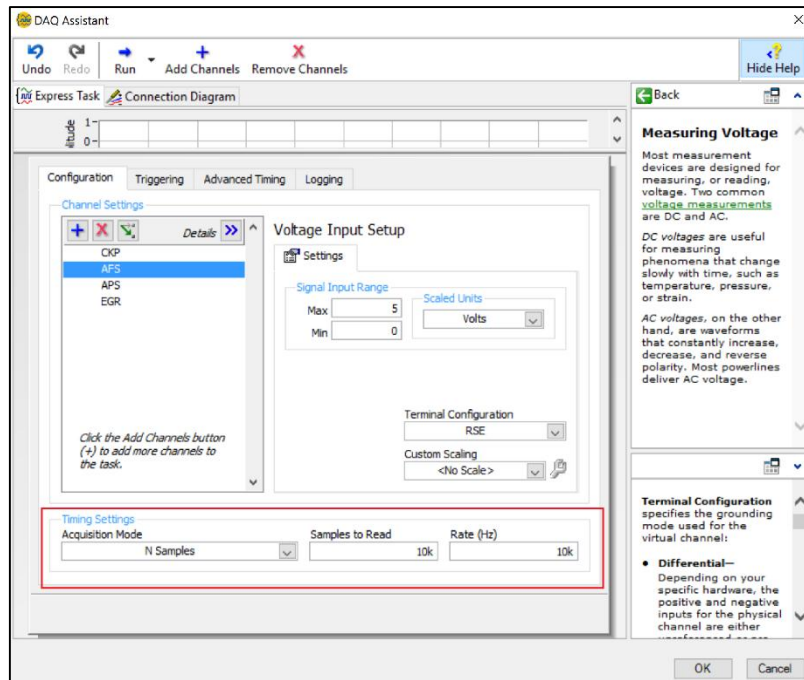


Figura 28. Configuración DAQ NI USB 6212 (Timing Settings). Fuente: Autores.

8. Finalizada la configuración, clic *ok*, se creara un nuevo VI.
9. Para obtener 4 señales de salida, desde el nuevo VI: *clic derecho*> *Express*> *Sig Manip*> *Split Signals*> Una obtenido el nuevo VI, se lo desplaza hacia abajo hasta obtener 4 salidas. Posteriormente se conecta con el VI DAQ Assistant (Figura 29).

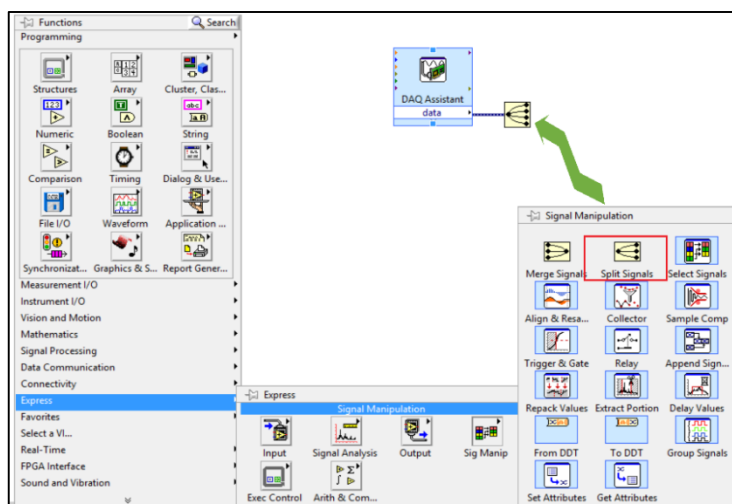


Figura 29. Configuración VI (Split Signals). Fuente: Autores.

10. Para que el nuevo VI no se detenga sin alguna interrupción se utiliza *While Loop*: *clic derecho*> *Express*> *Execution Control*> *While Loop*. Se

creara una cuadrícula dentro la cual se colocará toda la programación en curso (Figura 30).

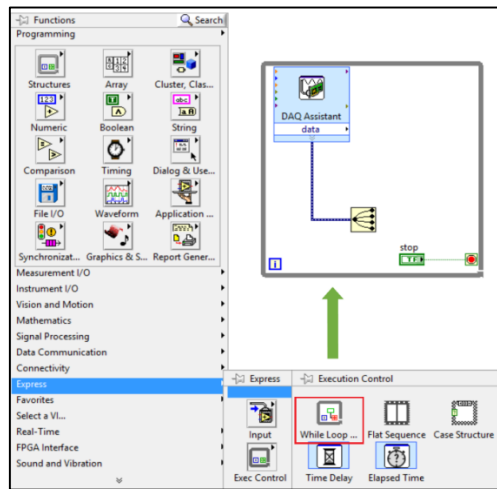


Figura 30. . Configuración VI (While Loop). Fuente: Autores.

11. Para convertir un cable de información en un valor numérico se utiliza *From DDT (Convert from Dynamic Data)*: clic derecho > *Express* > *Sig Manip* > *From DDT*, se aplica a cada una de las 4 salidas (Figura 31), las salidas se unirán en un extremo de la cuadrícula *While Loop*. Para la visualización de las señales que están ingresando: *Front panel* > *Clic derecho* > *Graph* > *Waveform Chart*, de igual forma se crea un *Waveform Chart* para cada salida, se tiene nuevos VI que da el programa automáticamente en el panel *Block Diagram*, estos se unirán a las salidas de cada una de las señales (Figura 32).

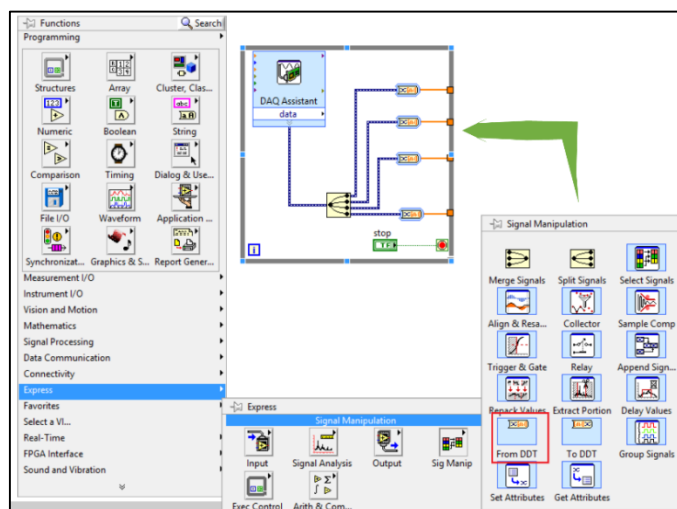


Figura 31. Configuración VI (From DDT). Fuente: Autores.

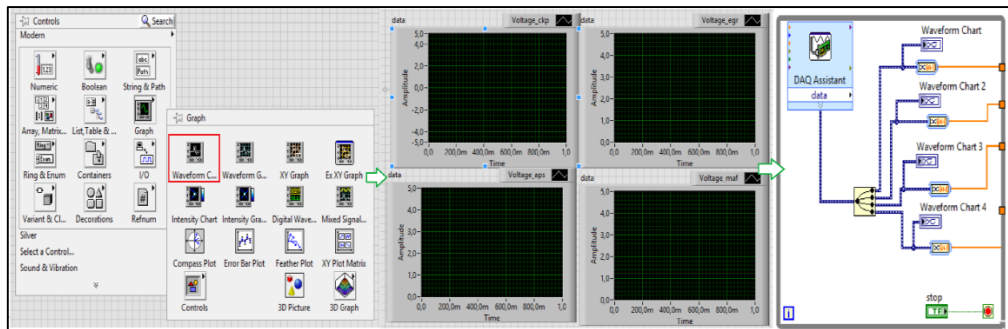


Figura 32. Configuración VI (Waveform Chart). Fuente: Autores

12. Para obtener una matriz de datos de toda la información que se está obteniendo, se crea un *array*: *clic derecho*> *Array*> *Build Array* (Figura 33), una vez obtenido el VI se desplaza hacia abajo para crear cuatro entradas. Se unen las salidas de las señales de *While Loop* a las entradas del *Array* creado. La información obtenida será enviada a una hoja de cálculo para posteriormente ser guardada en una determinada carpeta del ordenador: *clic derecho*> *File I/O*> *write delimited spreadsheet.vi* (Figura 34), la entrada del nuevo VI (2D data) es unida con la salida del *Array* creado inicialmente, la información será guardada en diferentes columnas por lo que en la entrada del VI (*transpose?*), creamos una constante “verdadero” y de la salida (*file path*): *clic derecho*> *create*> *control*, en *control*, se indica la carpeta en la que será guardada la información en formato Excel (.exe). El VI completo para la adquisición de señales se muestra en la figura 35.

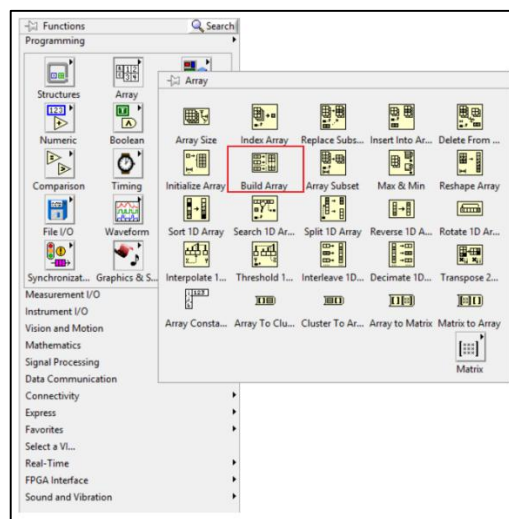


Figura 33. Configuración VI (Build Array). Fuente: Autores.

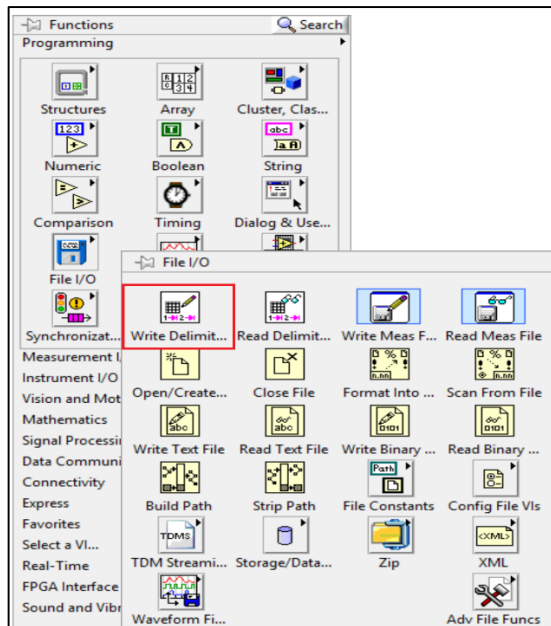


Figura 34. Configuración VI (write delimited spreadsheet.vi). Fuente: Autores.

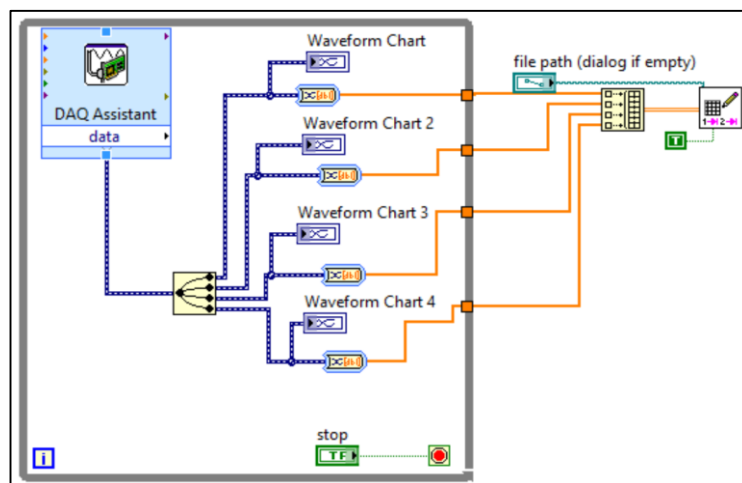


Figura 35. VI para adquisición de datos de sensores. Fuente: Autores.

Las señales obtenidas se pueden visualizar en el panel frontal (Front Panel) del VI creado (Figura 33), así como también se pueden representar en graficas mediante Matlab, los valores guardados en el documento de Excel, como se muestra a continuación:

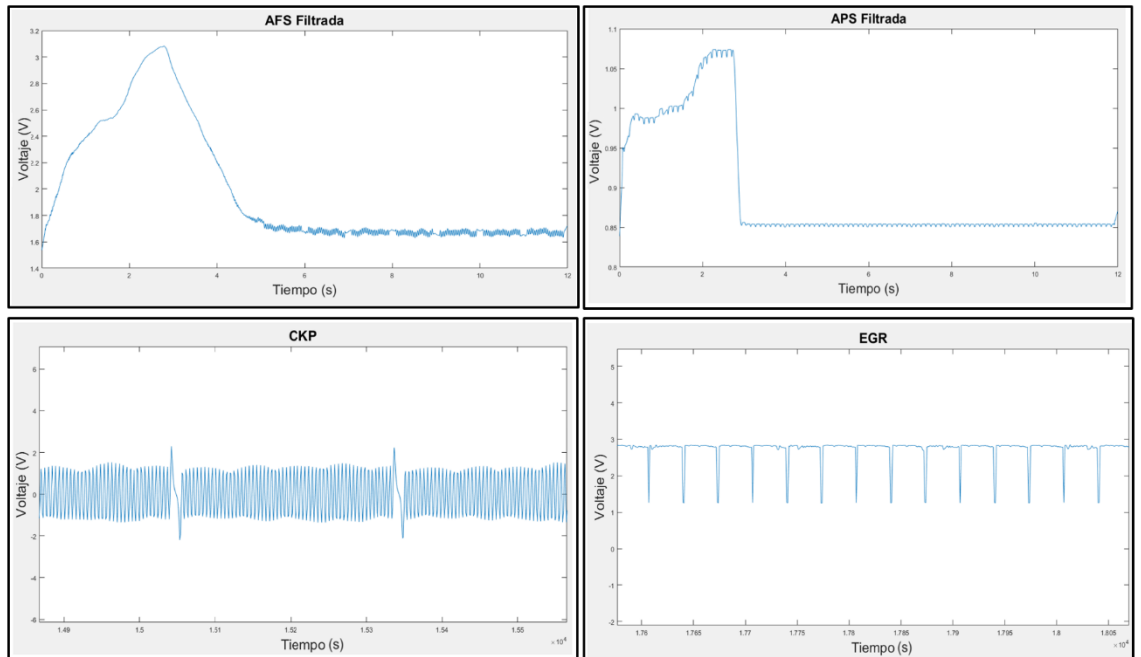


Figura 36. Visualización con MatLab de los valores obtenidos mediante una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212 y LabView. Fuente: Autores.

5.4.2. Clasificación de valores de las señales obtenidas.

Los valores de las señales obtenidas son clasificados de acuerdo al porcentaje de apertura de la válvula EGR. Las pruebas fueron realizadas en diferentes condiciones de funcionamiento del motor en carretera, para lo que se usó un vehículo Hyundai Tucson CRDi 2.0 el cual cuenta con el mismo motor con el que está equipado el banco didáctico Dae Sung G-120212.



Figura 37. Motor Hyundai Santa Fe CRDi 2.0. Fuente: Autores.

Los valores obtenidos se muestran en las tablas de los Anexos 2, 3 Y 4, de las cuales se han obtenido las tablas 6, 7 y 8 de valores clasificados.

Tabla 6. Tabla de valores clasificados (Apertura EGR 5% - 49,4%). Fuente: Autores.

MAF (V)	RPM	APS (V)	EGR (%)
3,13	2845	2,048	5
3,13	2845	1,803	5
3,34	2156	2,49	5
2,2	2780	0,733	5
2,4	2112	0,733	5
2,39	2137	0,733	5
4,42	2619	2,678	5
2,06	726	0,733	5
2,48	1000	0,943	5
2,39	1379	1,075	5
2,78	1972	1,227	5
2,91	2438	1,29	5
3,02	2397	0,733	5
2,98	2145	1,354	16,1
2,94	1717	1,188	16,1
3,017	2458	1,29	18,2
3,017	714	0,733	18,2
2,46	1841	0,733	19,2
3,12	1469	1,486	19,2
3,02	2397	0,733	31,6
2,87	2397	0,733	31,6
3,75	2306	1,968	37
3,54	2156	2,488	39,6
2,21	1091	0,733	40,1
3,41	1368	1,59	49,4

Tabla 7. Tabla de valores clasificados (Apertura EGR 51,4% - 95%). Fuente: Autores.

MAF (V)	RPM	APS (V)	EGR (%)
4,13	2619	2,678	51,4
2,97	1340	1,59	53,4
3,37	1645	1,803	75,1
3,32	1645	1,623	75,1
3,32	1777	1,623	75,1
2,15	1717	0,733	75,2
2,15	1641	0,733	75,2
2,68	761	0,733	70,7
3,017	714	0,733	75,6
2,19	715	0,733	75,6
2,83	738	0,733	77,2
2,13	738	0,733	77,2
2,13	717	0,733	77,2
2,77	1788	1,549	95
3,45	2567	1,686	95
3,22	2288	1,74	95
3,71	2046	1,442	95
3,63	2085	1,96	95
3,61	2215	2,097	95
3,7	2215	2,023	95
3,71	2202	2,053	95
3,52	2319	1,082	95
3,67	2227	1,082	95
3,67	2118	1,984	95
2,2	681	0,733	95

Tabla 8. Tabla de valores clasificados (Apertura EGR 95%). Fuente: Autores.

MAF (V)	RPM	APS (V)	EGR (%)
2,83	1428	0,733	95
2,04	1578	0,733	95
2,32	1042	0,733	95
2,05	1333	0,733	95
2	1076	0,733	95
2,01	697	0,733	95
2,01	888	0,733	95
2,07	1402	0,733	95
2,22	1790	0,733	95
2,32	1275	0,733	95
2,22	1273	0,733	95
2,1	1140	0,733	95
2,16	1157	0,733	95
2,28	1026	0,733	95
2,11	810	0,733	95
2,06	1018	0,733	95
1,45	1172	0,948	95
2,05	1062	0,733	95
2,01	837	0,733	95
2,17	1236	0,733	95
2,07	1685	0,733	95
2,2	1855	0,733	95
2,09	721	0,733	95
1,93	715	0,733	95
1,94	717	0,733	95

5.4.3. Diseño e implementación del controlador Difuso.

5.4.3.1. Protocolo de adquisición de señales e implementación de un controlador difuso.

La figura 35 muestra el flujograma del protocolo de adquisición de señales e implementación de un controlador difuso a seguir, el cual como se muestra en la figura 36 se desarrolla mediante fases.

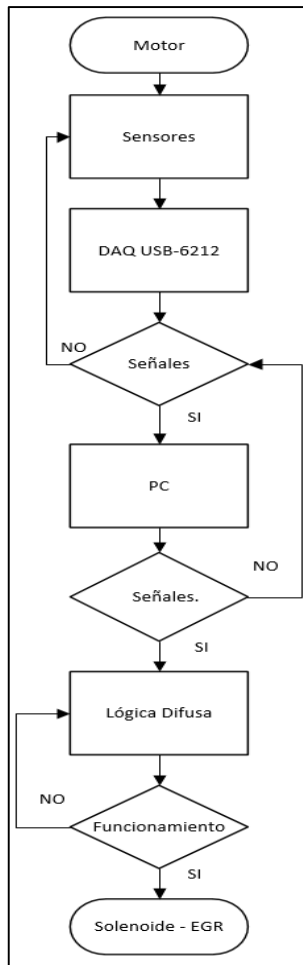


Figura 38. Flujograma de adquisición de datos e implementación de un controlador difuso.

Fuente: Autores.

Para identificar y comprobar si las señales que ingresan a la tarjeta DAQ NI USN 6212 y a la PC, son las correctas, se hace referencia a la figura 36 del inciso 5.4.1 en la cual se indica la forma de cada señal, en el caso de no que no exista similitud alguna o no se esté obteniendo ningún tipo de señal se comprueba lo siguiente:

- Verificar que las conexiones se realizaron correctamente (cables sueltos, pines de conexión incorrecto, continuidad en los cables de conexión).
- Verificar que los sensores cuenten con su masa y voltaje de alimentación correspondiente.

- Verificar que las conexiones no presenten corto circuitos, ya que podría llegar a afectar tanto a tarjeta de adquisición de datos como a la ECM del motor.
- Verificar los puertos de conexión de la tarjeta DAQ NI USB 6212, que no se encuentren quemados o que exista continuidad entre ellos.

Establecido el diseño del controlador difuso, se procede a evaluarlo, es decir comprobar que la variable de salida vaya acorde al funcionamiento del control propuesto, de no ser este el caso se deben comprobar cada uno de los componentes del sistema, sus funciones de membresía, conjuntos difusos, método de defusificación etc.

Una vez que no se presenten problemas, el sistema está listo a ser implementado en el solenoide de la válvula EGR y en el motor en si.

5.4.3.2. Fases de diseño e implementación de un controlador Difuso.

Las señales a ser procesadas son las señales de los tres sensores implicados en el funcionamiento de la válvula EGR (CKP, APS, AFS), la señal obtenida del solenoide de la válvula EGR establece los valores de apertura de la válvula EGR por lo que se le considera en el sistema como señal de salida o activación. Po lo tanto las fases de diseño e implementación quedan establecidas de la siguiente forma:

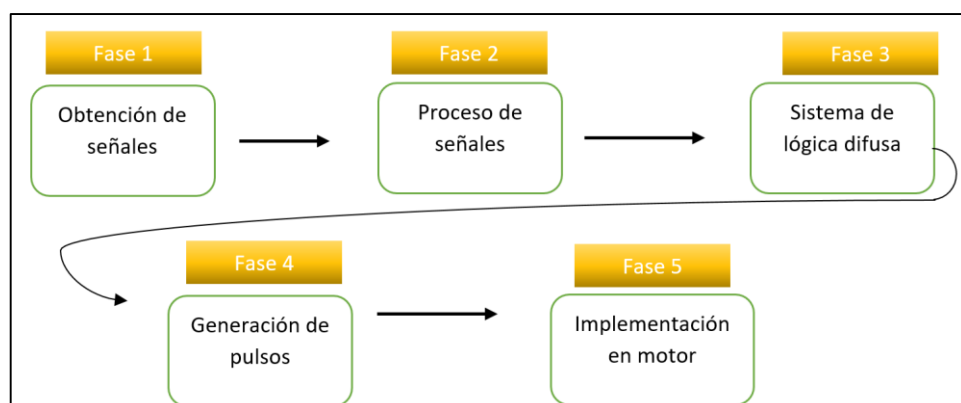


Figura 39. Diagrama de bloques para el diseño e implementación de un controlador Difuso.

Fuente: Autores.

5.4.3.2.1. Fase 1 (Obtención de señales).

Para la obtención de señales se efectúan los pasos explicados en el apartado 5.5.1. las diferencias es que en estas fases de diseño únicamente se toman en cuenta las señales de entrada APS, AFS y CKP ya que la señal del solenoide de la válvula EGR es una señal de activación del sistema de recirculación de gases de escape, así como también las señales son tomadas en tiempo real. Debido a la presencia de vibraciones en el funcionamiento del motor se generan oscilaciones llamadas ruido las cuales son visualizadas en el panel frontal del software de programación LabView, estos ruidos son filtrados para obtener una señal libre de ruidos y así tener señales de ingreso al sistema difuso que no lo desestabilicen o produzcan una mala lectura del mismo en el instante de la implementación del controlador en el motor.

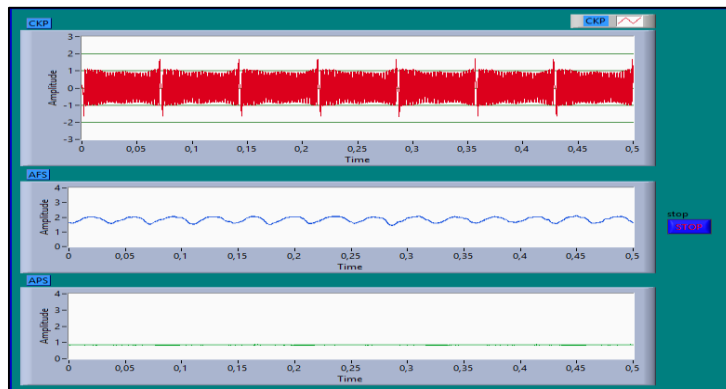


Figura 40. Visualización en LabView de señales obtenidas mediante una DAQ NI USB 6212 (Ralentí). Fuente: Autores.

5.4.3.2.2. Fase 2 (Proceso de señales).

En esta fase se procede a filtrar las señales para evitar que exista ruido, este filtrado se realiza para las señales de los sensores APS, AFS y CKP, en el caso de la señal del sensor CKP se realiza una programación en la cual se efectúe una conversión de la señal dada en RPM (Revoluciones Por Minuto).

5.4.3.2.2.1. Filtrado de señales.

Para la selección de un filtro de señal, se consideran los siguientes parámetros:

- Filtro que no perturbe los valores verdaderos de las señales de entrada.
- La señal debe ser lo más exacta posible por lo que el filtro seleccionado no debe afectar de manera significativa, la forma de la onda.

De esta forma se garantiza que el filtro no modificara la señal del sensor, permitiendo que el sistema sea eficaz y no tenga ruido o perturbaciones relevantes que afecten su funcionamiento.

Mediante el software de programación LabView se creara un instrumento virtual, específicamente *Smoothing Filter*, el cual nos da una serie de opciones para el diseño de nuestro filtro, el acceso y modificación a este instrumento virtual se muestra a continuación:

- *Block Diagrama* > *Clic derecho* > *Express* > *Signal Analysis* > *filter* (Figura 38), el programa nos mostrara automáticamente una ventana *Configure Filter [Filter]*. En las señales de los sensores AFS y APS únicamente se desea eliminar las perturbaciones debido al ruido que se presenta en las mismas, por lo que se selecciona un filtro de suavización rectangular (*Smoothing Filter*), este filtro tiene como principio el algoritmo de suavizado, el algoritmo de suavización rectangular es el más simple, el cual reemplaza cada punto de la señal con el promedio de “m” puntos adyacentes, donde “m” es un entero positivo denominado “smooth width”, una vez realizada la configuración, *clic ok* (Figura 39), se crea dos instrumentos virtuales para las señales de los sensores AFS y APS respectivamente.

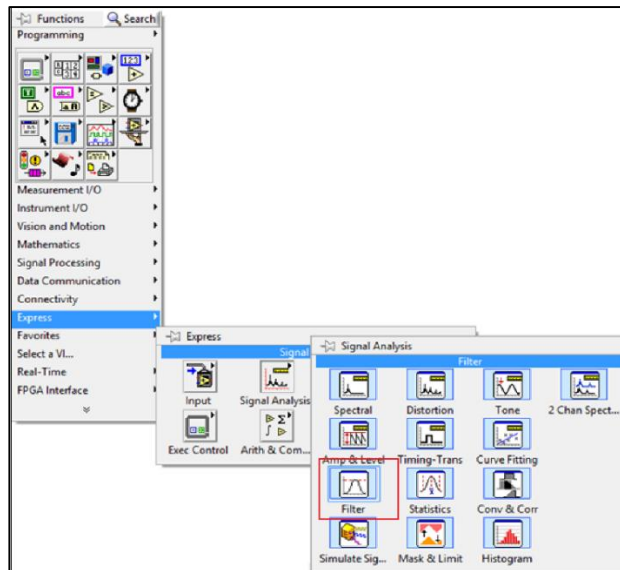


Figura 41. Filtrado de señales AFS y APS en LabView (Filter). Fuente: Autores.

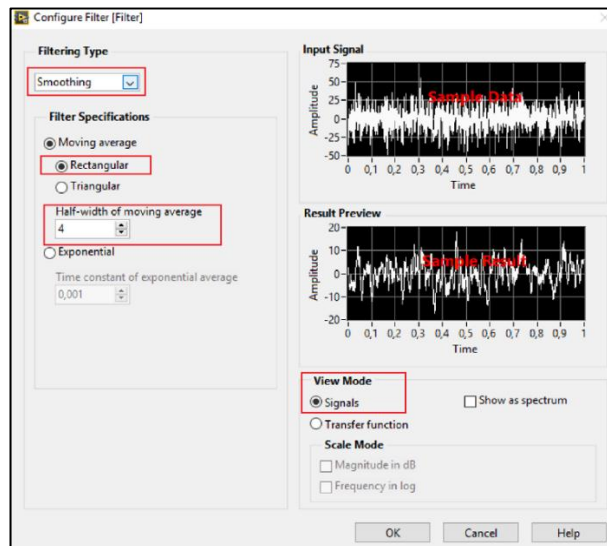


Figura 42. Filtrado de señales AFS y APS en LabView (Configure Filter). Fuente: Autores.

5.4.3.2.2.2. Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Revoluciones Por Minuto).

Previo a la conversión de la señal del sensor CKP a RPM, se filtra la señal del sensor mediante los siguientes pasos:

- *Block panel* > clic derecho > *Signal Processing* > *Filters* > *Butterworth Filter.vi* (Figura 40).

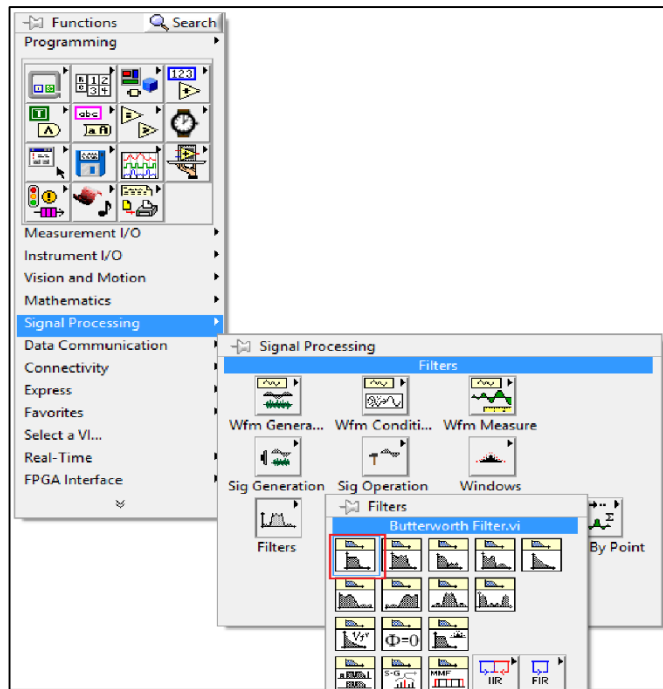


Figura 43. Filtrado de señal CKP en LabView (Butterworth Filter). Fuente: Autores.

- Inmediatamente se obtiene un nuevo instrumento virtual *Butterworth Filter*, como podemos observar en la figura 44, este instrumento virtual puede ser modificado de acuerdo a sus entradas, por lo tanto, para la señal del sensor CKP se utiliza un filtro pasa bajo *Lowpass*, este filtro es usado para eliminar falsos picos debido a que en los siguientes pasos se utiliza un detector de picos, para realizar la conversión de datos de señal a RPM, entonces este filtro evita que exista una mala detección de picos cuando el motor se encuentre en variaciones de su régimen de funcionamiento por ejemplo si se varia de ralentí a 1500rpm, a 2000rpm etc, por lo que existirá variaciones de vibración y frecuencia en la señal CKP del motor por su desarrollo y por ende más ruido que afecte la señal.

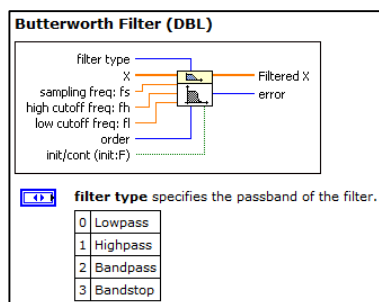


Figura 44. Filtrado de señal CKP en LabView (Butterworth Filter). Fuente: Autores.

Una vez filtrada la señal del sensor CKP, se procede a la conversión de la señal de entrada en revoluciones por minuto, para lo que se siguen los pasos mostrados a continuación:

- Debido a que se necesita un tramo en el cual se detecten los picos, se utiliza *Array Size Function* (1) al cual se le restara 1000 datos, y una porción de estos datos ingresan a la entrada *length* del *Array Subject Function* (2), en la entrada *Index* de este se designara que la muestra sea de 1000 datos, por lo tanto de la salida *Subarray* se envía una muestra de 1000 datos de la señal de entrada.

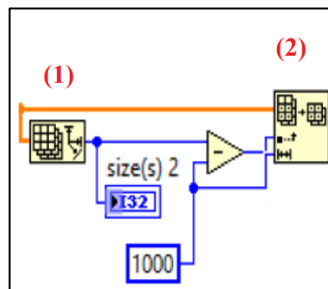


Figura 45. Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Array). Fuente: Autores

- *Block Diagram* > clic derecho > *Signal Processing* > *Signal Operation* > *Peak Detector.vi* (Figura 46). Con este instrumento virtual se detecta todos los picos de la señal del sensor CKP, la configuración de sus entradas se modifican de acuerdo a sus designaciones como se muestra en la figura 43. Por lo tanto en la entrada “X” se une la salida de la señal filtrada, para establecer un límite en el cual se contarán los picos, configuramos la entrada *threshold* con un valor de 0,04, se establece tal valor debido a que en este rango se obtiene la cantidad de revoluciones por minuto correcta.

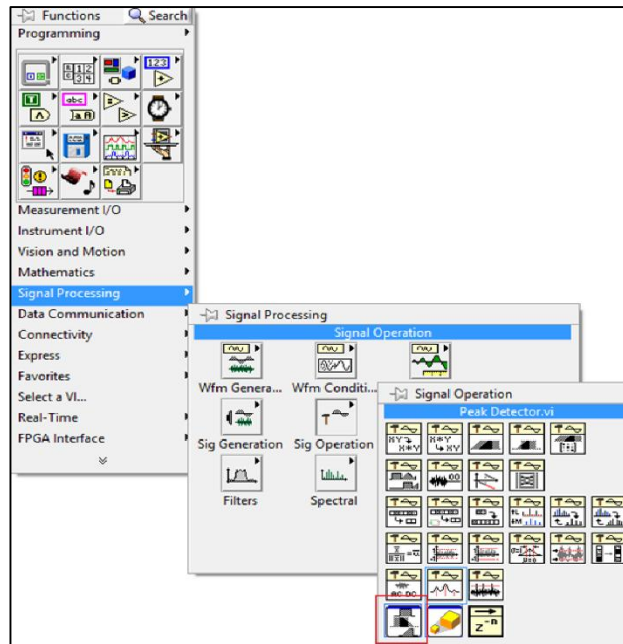


Figura 46. Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Peak Detector). Fuente: Autores.

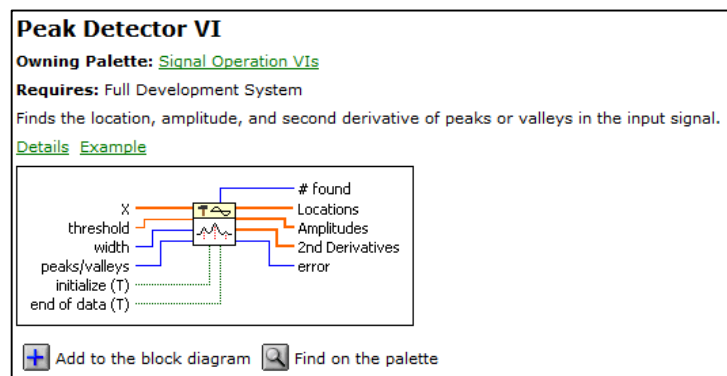


Figura 47. Conversión de la señal del sensor CKP a RPM (Peak Detector VI).

Fuente: Autores

- A la salida *found* del contador de picos (Figura 47) se multiplica por una constante, dicha constante se la designada de acuerdo al número de picos y las revoluciones del motor en ese instante. Finalmente se crea un indicador *Gauge*, mediante el cual se puede visualizar en el panel frontal del programa el número de RPM en el que se encuentra el motor. El programa conversor se muestra en la figura 45.

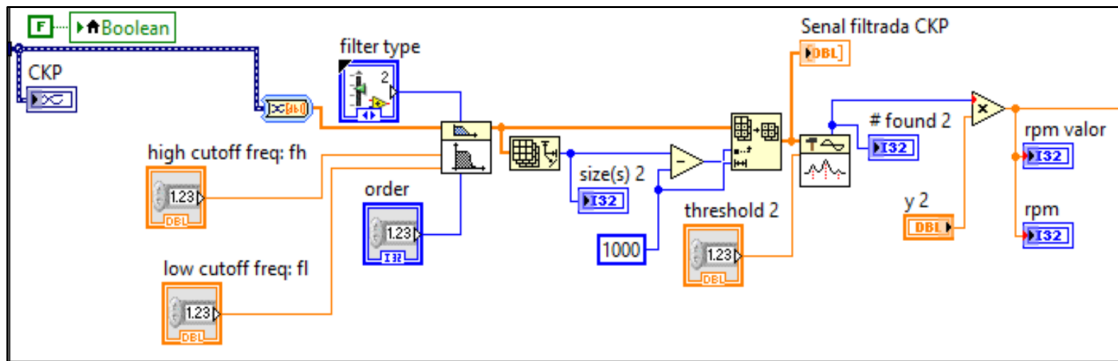


Figura 48. Programa conversor de la señal del sensor CKP revoluciones por minuto (VI). Fuente: Autores.

Una vez realizados los filtros de las señales de los sensores y la conversión de la señal del sensor CKP a RPM, en la figura 46 se puede ver las señales y valores que ingresan al sistema Difuso.

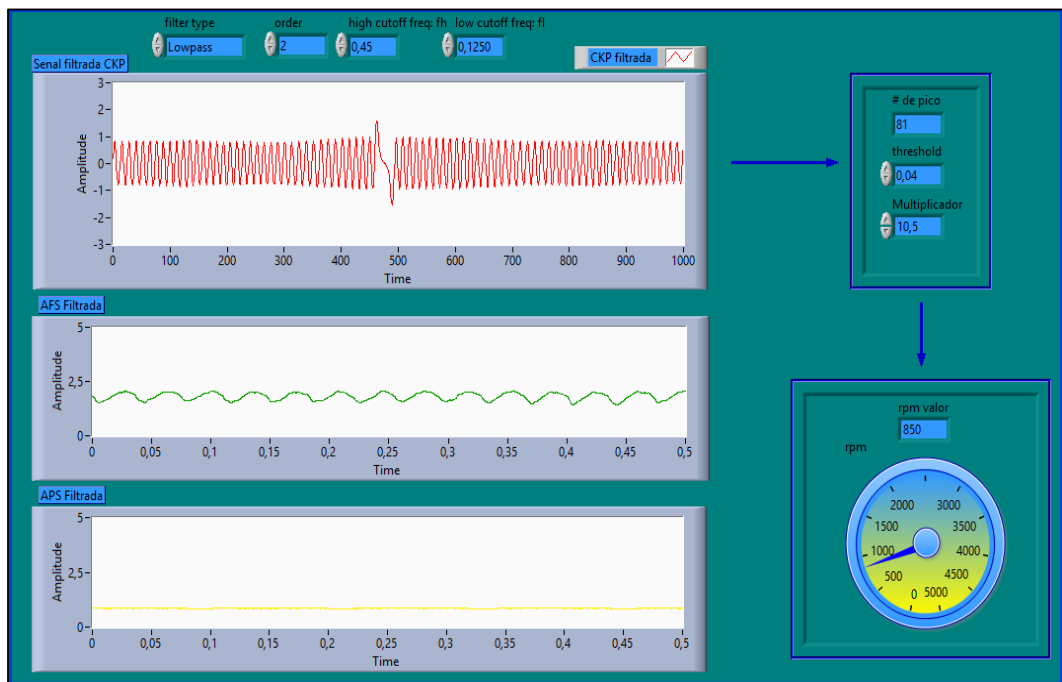


Figura 49. Señales de entrada filtradas y conversión de la señal del sensor CKP a RPM. Fuente: Autores.

5.4.3.2.3. Fase 3 (Sistema de lógica Difusa).

En esta fase se desarrolla el sistema de lógica difusa, para este desarrollo se debe entender el funcionamiento de la válvula EGR, es decir determinar los diferentes rangos de activación del sistema EGR, para lo cual se estudia los valores que

presentan las tablas 6, 7 y 8 del inciso 5.4.2, las cuales indican en que porcentaje se encuentra el ancho de pulso (PWM) de la señal de activación del solenoide de la válvula EGR con respecto a diferentes condiciones de funcionamiento del motor.

El protocolo para el diseño del sistema difuso a seguir se presenta en el siguiente flujograma:

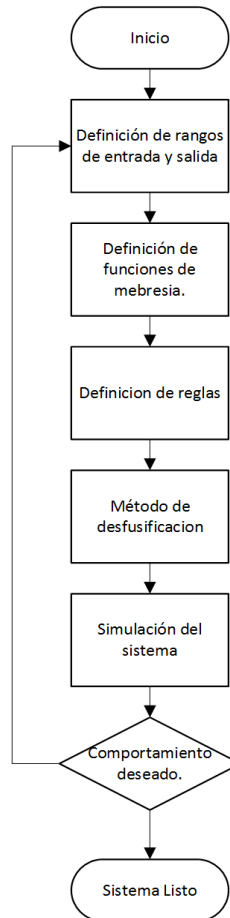


Figura 50. Protocolo de diseño de un controlador Difuso. Fuente: Autores.

El diseño del sistema difuso se desarrolla en el software de instrumentación virtual LabView, con el uso de la herramienta *Fuzzy System Designer*, la cual minimiza la programación del sistema difuso, debido a que facilita el ingreso de valores de entrada, funciones de membresía, reglas y mediante defusificación genera diferentes valores de salida para la activación del solenoide de la válvula EGR. Los pasos a seguir para el uso de esta herramienta son:

- *Tools>Control and Simulation>Fuzzy Sytem Designer* (Figura 51).

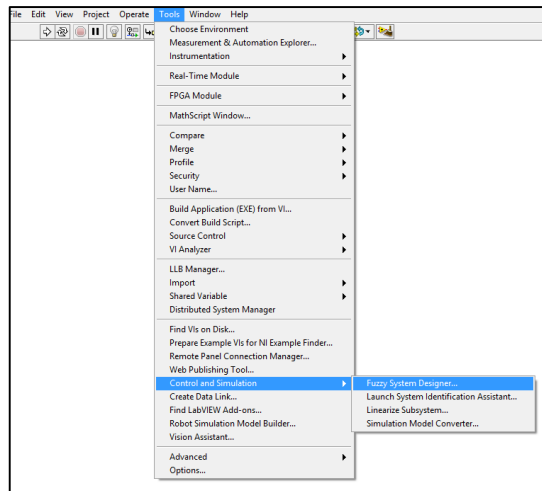


Figura 51. Diseño de un sistema Difuso mediante LabView (Fuzzy System Designer). Fuente: Autores.

El programa muestra el panel (Figura 52), para el diseño de sistemas difusos, en el cual se tienen 3 diferentes etapas:

- Variables: en esta opción se designan las variables de entrada, sus rangos de funcionamiento y funciones de membrecía.
- Rules: En esta etapa se definen las reglas y el método de desfusificación, las cuales dictaran el funcionamiento de sistema.
- Test System: esta opción permite probar el sistema difuso, dando valores a cada una de las entradas y viendo el valor de salida para saber si cumple con la expectativa o funcionalidad correcta del sistema.

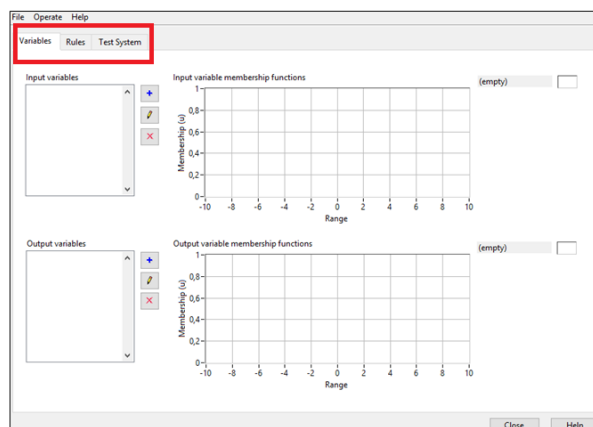


Figura 52. Diseño de un sistema Difuso mediante LabView (Fuzzy System Designer). Fuente: Autores.

5.4.3.2.3.1. Valores de entrada, salida y funciones de membresía.

Los valores de entrada y funciones de membresía, se las define a continuación:

- RPM: 0 hasta 3200 revoluciones por minuto, para el límite máximo de revoluciones se toma en cuenta el valor establecido por el fabricante.
- AFS: 0 hasta 5 voltios ya que es el rango de funcionamiento del sensor
- APS: de 0 a 4 voltios ya que es el rango de funcionamiento del sensor

Previo a la designación de funciones de membresía a los valores de entrada, se determina la forma de la función de membresía. Para el presente diseño se designa una forma “trapezoidal” debido a que se requiere que el sistema se active de manera estable en un determinado rango de valores y en combinación con otras funciones de membresía.

Para los valores de entrada de RPM se establecen 4 funciones de membresía (Figura 53), las cuales se basan en los diferentes rangos de funcionamiento del motor del cual se obtuvieron las señales de muestra, estas funciones son consideradas de acuerdo al porcentaje de apertura de la válvula EGR. Los rangos considerados son:

- Ralentí: 600 a 900rpm, rango de valores en el cual el motor no se encuentra acelerado.
- Media Carga: 1200 a 2000rpm, rango de valores en el cual el motor se encuentra con aceleración media.
- Full carga: 2400 a 3000rpm, rango de valores en el cual el vehículo está completamente acelerado.
- Fuera de límite: 3000rpm y valores superiores son considerados fuera de límite debido a que después de estos valores no se requiere la activación del sistema EGR.

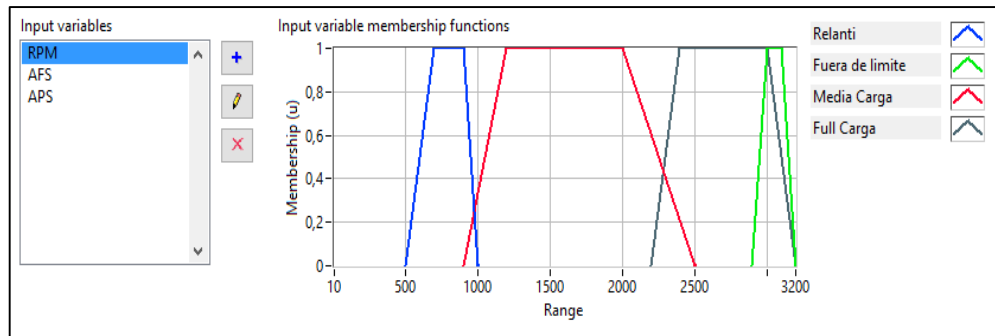


Figura 53. Funciones de membresía de entrada (RPM). Fuente: Autores.

Para los valores de la señal del sensor AFS, los rangos de las funciones de membresía se muestran en la figura 54, las cuales son:

- Poco flujo másico de aire: 0.6v a 0.9v, rango de valores en el cual el motor no se encuentra acelerado por lo que el sensor de flujo de aire no estará dando ninguna señal.
- Medio flujo másico de aire: 2v a 3v, rango de valores en el cual el motor se encuentra con aceleración media, por lo que el sensor emitirá señales al detectar flujo másico de aire.
- Máximo flujo másico de aire: 3.5v a 4.3v, debido a que el flujo másico de aire está a su límite máximo permitido en la cámara de combustión.

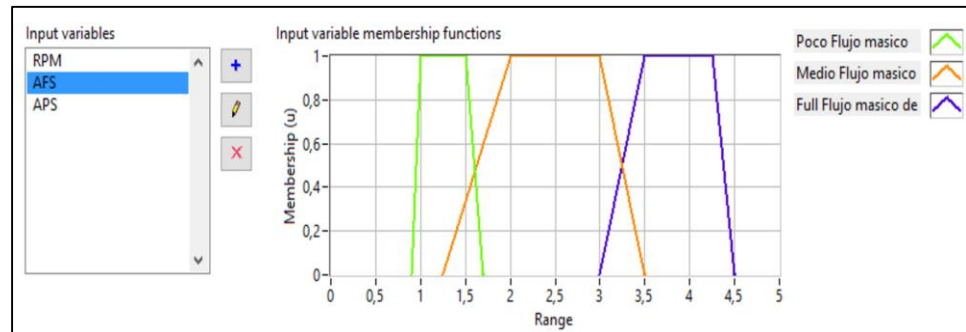


Figura 54. Funciones de membresía de entrada (AFS). Fuente: Autores.

Para los valores de la señal del sensor APS, los rangos de las funciones de membresía se muestran en la figura 55, las cuales son:

- Sin accionar el pedal: 0.6v a 0.7v, el pedal no está activado por lo que el sensor APS no estará dando ningún tipo de señal.

- Pedal a un cuarto: 1.2v a 1.5v, al estar el pedal ligeramente accionado el sensor emitirá señal.
- Pedal a medio: 1.7v a 2.3v, en este rango el pedal estará accionado en un nivel intermedio por lo que sensor emitirá señales.
- Completamente accionado: 2.3v a 2.5v, el pedal estará completamente accionado, y se tendrán las señales con los valores máximos del sensor.

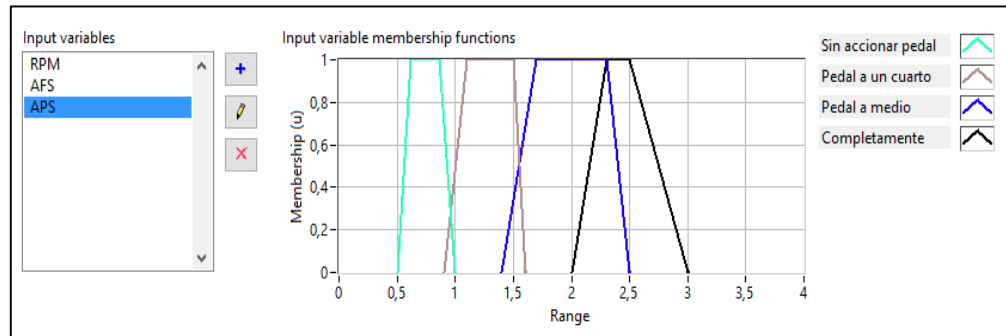


Figura 55. Funciones de membresía de entrada (APS). Fuente: Autores.

La función de membresía de los valores de salida para la activación del solenoide de la válvula EGR (Figura 56), se los designa desde un porcentaje de apertura del 5% al 95%, de tal forma que la activación sea progresiva.

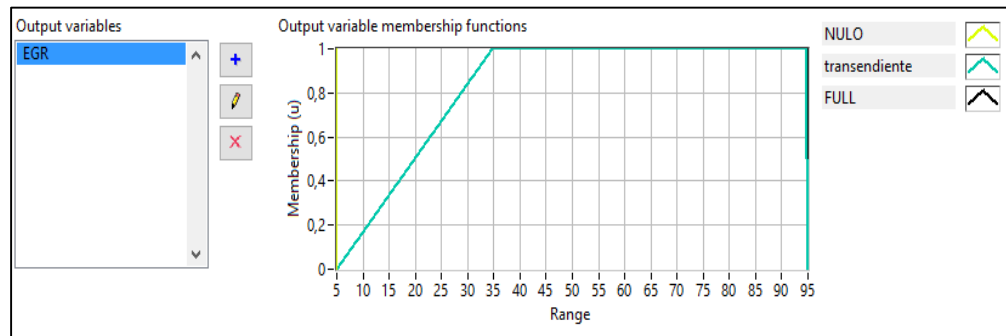


Figura 56. Función de membresía de salida (EGR). Fuente: Autores.

5.4.3.2.3.2. Reglas.

En la pestaña rules del panel de diseño del sistema difuso dado por el programa (Figura 54) se establecen las diferentes reglas con las que contara el sistema difuso.

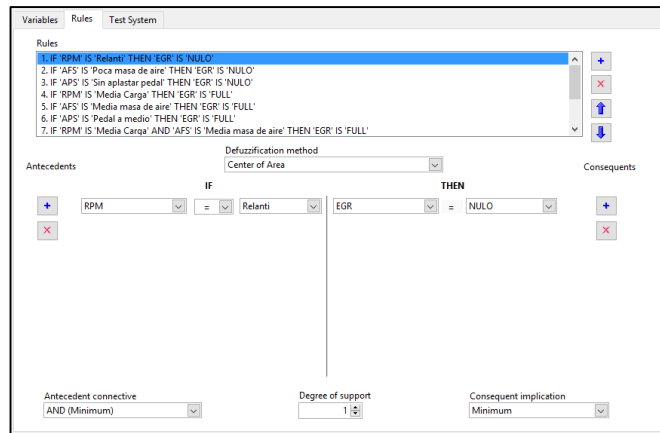


Figura 57. Reglas del sistema difuso. Fuente: Autores.

1. Si 'RPM' es 'Ralentí' entonces 'EGR' es 'NULO'
2. Si 'AFS' es 'Poca masa de aire' entonces 'EGR' es 'NULO'
3. Si 'APS' es 'Sin aplastar pedal' entonces 'EGR' es 'NULO'
4. Si 'RPM' es 'Media Carga' entonces 'EGR' es 'FULL'
5. Si 'AFS' es 'Media masa de aire' entonces 'EGR' es 'FULL'
6. Si 'APS' es 'Pedal a medio' entonces 'EGR' es 'FULL'
7. Si 'RPM' es 'Media Carga' y 'AFS' es 'Media masa de aire' entonces 'EGR' es 'FULL'
8. Si 'RPM' es 'Relanti' y 'APS' es 'Sin aplastar pedal' entonces 'EGR' es 'NULO'
9. Si 'APS' es 'Sin aplastar pedal' entonces 'EGR' es 'NULO'
10. Si 'RPM' es 'Full carga' entonces 'EGR' es 'NULO'

Con este conjunto de reglas se define el funcionamiento del sistema difuso, el cual es, si pasa algo en la entrada entonces tiene una repercusión en la salida. Según un criterio general se puede establecer varias reglas según las funciones de membresía de las variables de entrada, el número límite para las reglas se puede definir como la ecuación (3):

$$\text{numero limite de reglas} = n^m \quad (3)$$

$n = \text{variables de entrada}$

$m = \text{funciones de membresía.}$

Aun que se debe considerar que entre más reglas, el sistema tiende a necesitar más tiempo para procesar el sistema difuso por lo que depende de la capacidad de proceso del ordenador el tener una respuesta rápida o no. Entonces lo deseado es realizar un sistema lo más eficaz posible y poder obtener los resultados deseados.

Para el sistema de la EGR se ha establecido 10 reglas básicas las cuales definen el funcionamiento del solenoide de la válvula EGR según los datos obtenidos en el paso 5.4, cada regla es específica y no es contradictoria con ninguna otra.

5.4.3.2.3.3. Defusificación.

Para obtener una variable solución no difusa, se selecciona uno de los varios métodos para la conversión del conjunto difuso de salida.

Los métodos de defusificación que presenta el programa son:

- Centro de área.
- Centro de área modificado.
- Centro de sumas.
- Centro de máximos.
- Media de máximos.

Debido a que los centros de sumas, centro de máximos y media de máximos, no son exactos u ópticos, debido a que los puntos máximos pueden ser alcanzados por otros, se elige el método de centro de área como el método de defusificación para el sistema difuso a ser implementado en el motor (Figura 58).

La principal ventaja del método de centro de área es que no representa un gasto computacional debido a que se ha establecido tanto en las entradas como en las salidas conjuntos difusos trapezoidales, por lo que el cálculo de centro de áreas es procesado por el programa de manera instantánea.

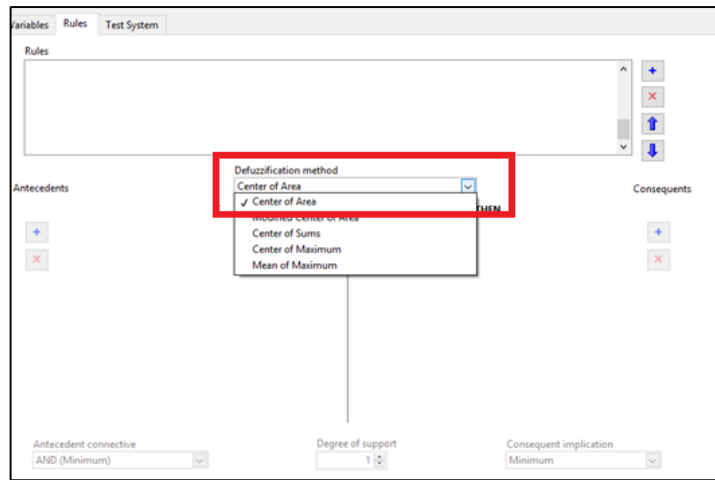


Figura 58. Elección del Método de Desfusificación en LabView. Fuente Autores.

5.4.3.2.3.4. Prueba del sistema.

Una vez establecidas las funciones de membresía para las variables de entrada y salida, reglas y desfusificación, se realiza una prueba del sistema diseñado, esta prueba se realiza en la opción “Test System” (Figura 59), el cual muestra las variables de entrada, las cuales se pueden modificar para realizar diferentes pruebas, y el valor de la variable de salida, esta es la respuesta del sistema a las diferentes variaciones que se den a las variables de entrada; así como también una gráfica de superficie que relaciona las variables de entrada con la variable de salida.

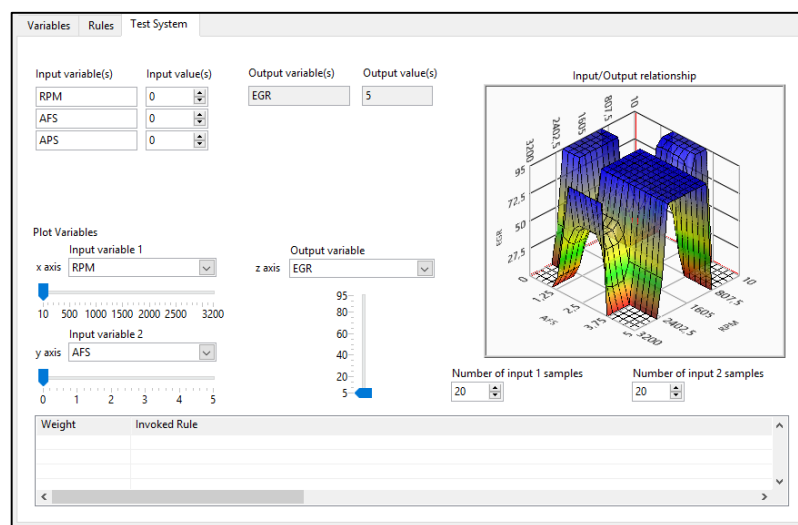


Figura 59. Opciones de prueba del Sistema Difuso diseñado. Fuente: Autores.

Las gráficas de superficie que se visualizan en las figuras 60, 61 y 62, establecen la relación de las variables de entrada con la variable de salida, de acuerdo a las variaciones que se le de al sistema esta grafica deberá cambiar su forma, determinando así que el sistema difuso diseñado esta relacionando las tres variables de entrada y dando una variable de salida, según estas variables se tienen las siguientes relaciones:

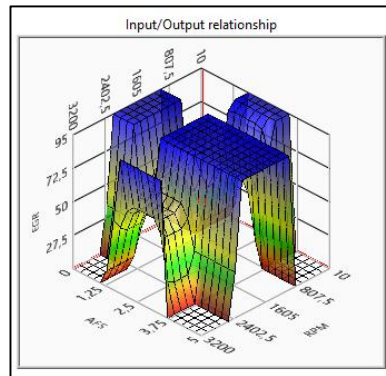


Figura 60. Relación de variables de entrada y salida (AFS-RPM-EGR). Fuente: Autores.

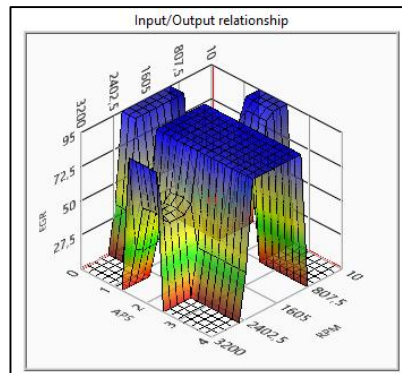


Figura 61. Relación de variables de entrada y salida (APS-RPM-EGR). Fuente: Autores.

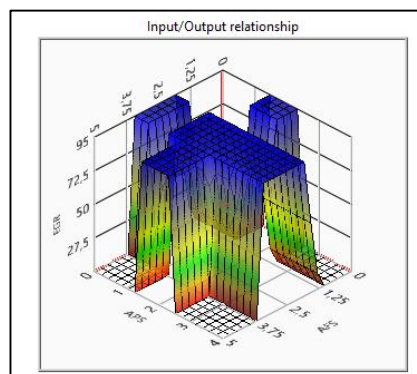


Figura 62. Relación de variables de entrada y salida (AFS-APS-EGR). Fuente: Autores.

Una vez verificado que el sistema difuso responde correctamente a las diferentes variables de entrada, se procede a finalizar el diseño del sistema difuso, el software de programación crea automáticamente un archivo de extensión “.fs”, el cual será cargado en el programa mediante el instrumento virtual “File path”, para posteriormente enlazarse con la entrada “File path” del instrumento virtual “FL Load Fuzzy System VI (Figura 63), la salida de este “Fuzzy system out”, se une con la entrada “fuzzy system in”, del instrumento virtual “FL Fuzzy Controller VI” (Figura 64), ya que el sistema cuenta con tres variables de entrada y una de salida se selecciona en la opción “Polymorphic VI selector” que este tipo de controlador sea un sistema “MISO”, finalmente la salida “fuzzy system out” se une con instrumentos virtuales que permiten visualizar la variación de las funciones de membresía del sistema difuso en el panel frontal del programa, y la salida “output value” se conecta con el sistema generador de pulsos.



Figura 63. Lectura del controlador difuso (FL Load Fuzzy System VI). Fuente: Autores.

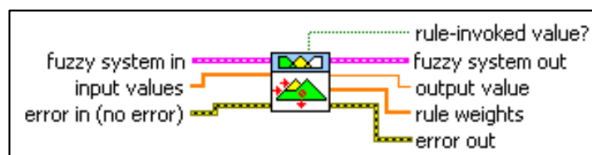


Figura 64. Controlador del sistema difuso (FL Fuzzy Controller VI). Fuente: Autores.

5.4.3.2.4. Fase 4 (Generación de pulsos de salida (PWM)).

Debido a que el sistema responde a los valores de entrada con valores de salida en porcentajes de apertura de la válvula EGR, se utiliza un instrumento virtual generador de pulsos el cual da una señal PWM de salida, la cual varía su amplitud de acuerdo a los porcentajes que este enviando el sistema difuso.

Los pasos a seguir para crear un instrumento virtual generador de pulsos, son los siguientes:

- *Block Diagrama > Clic Derecho > Functions > Waveform > Analog Waveform > Waveform Generation > Square Waveform.*

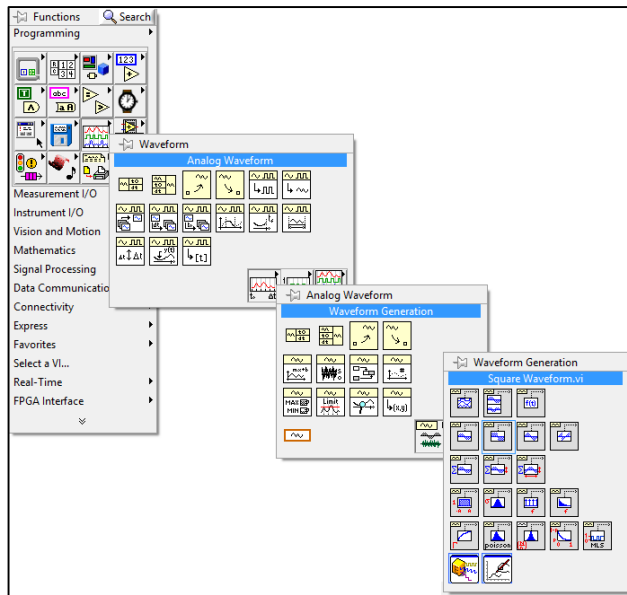


Figura 65. Generación de pulsos de salida (PWM). Fuente: Autores.

- La configuración de las entradas (Figura 66), estarán en modo *default*, a excepción de la entrada de frecuencia “*frequency*” (1 Hz) y la entrada “*Duty cycle (%)*” en la que ingresan los valores de salida del sistema difuso en porcentaje.

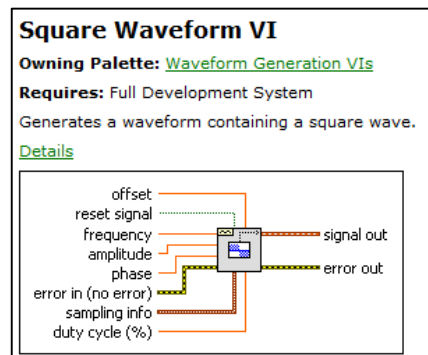


Figura 66. Generación de pulsos de salida (Square Waveform VI). Fuente: Autores

- La salida del VI generador de pulsos “*Signal out*”, es la señal de activación del solenoide de la válvula EGR, para lo cual se configura el puerto de salida de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212 de la siguiente forma: *Block Diagram*> *Clic derecho*> *Express*> *Output*> *DAQ Assist* (Figura 64).

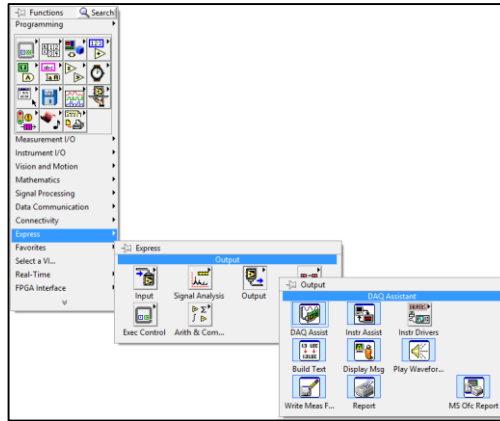


Figura 67. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output). Fuente: Autores

- En el panel de configuración el puerto de salida se modifica: *Generate Signals*> *Analog Output*> *Voltaje* (Figura 57), se designa un puerto de salida de señal “ao0” y finalmente clic en *Finish*. (Figura 58),

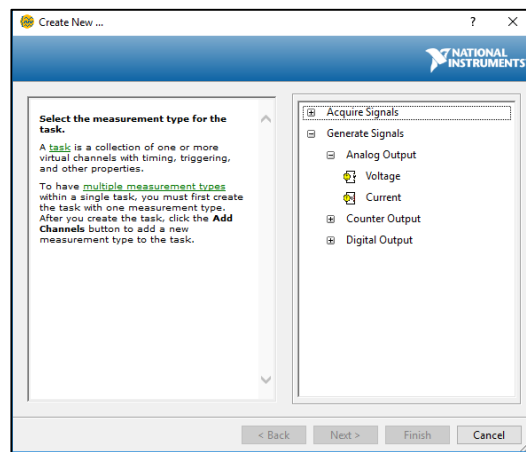


Figura 68. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output). Fuente: Autores

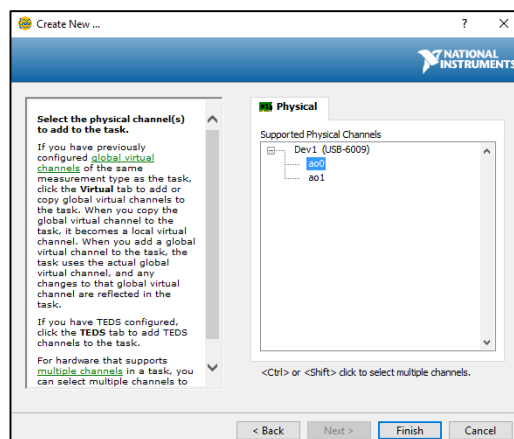


Figura 69. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output). Fuente: Autores

- En el panel de configuración se designa el nombre “PWM de EGR”, el rango de salida de la señal Max:10 y Min:0; *Terminal Configuration: RSE*; y finalmente se establece la frecuencia de salida con un valor de 30 Hz debido a que valores de frecuencia inferiores a 30Hz la señal de salida de la tarjeta de adquisición datos no activa el solenoide de la válvula EGR de acuerdo al sistema difuso (Figura 70).

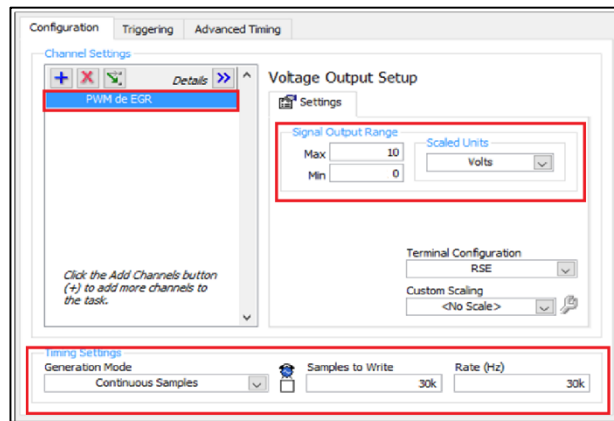


Figura 70. Generación de pulsos de salida (DAQ Assist Output). Fuente: Autores.

5.4.3.2.5. Fase 5 (Implementación en el Motor)

5.4.3.2.5.1. Estructura de bloques de funcionamiento del sistema Difuso.

Una vez establecido todo el sistema difuso, el VI completo se visualiza en el Anexo 5, al cual se lo divide en bloques estructurales a ser explicados a continuación.

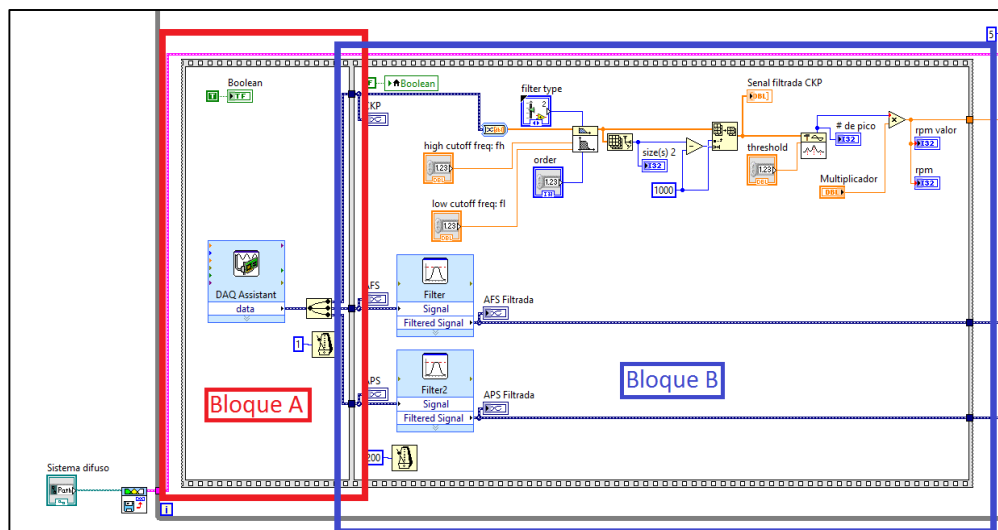


Figura 71. Estructura de bloques de funcionamiento del sistema Difuso. (A-B). Fuente: Autores.

➤ Bloque A

En el bloque A (Figura 71) se puede observar toda la programación correspondiente a la fase 1, esta está englobada en una parte de un instrumento virtual *Flat Sequence Structures* el cual se obtiene mediante: *function> Programming> Structures> Flat SequenceStructure*, se utiliza esta estructura para que las señales de entrada se consideren como los datos iniciales que se toma en consideración en el programa. Este también tiene un temporizador “*Wait Until Next ms Multiple Function*” el cual se obtiene mediante: *Functions> Programming> Timing> Wait Until Next ms Multiple Function*, este envía datos a la siguiente fase del instrumento virtual *Flat Sequence Structures* según el valor que se le dé a este.

Bloque B

En el bloque B (Figura 71), se realiza los pasos de la fase dos, es decir todo el proceso de tratamiento de señales, el cual esta enlazado en secuencia con la obtención de señales y con un mismo temporizador de tiempo que del bloque A, a diferencia de que en este caso se desfasa 200 milisegundos con el objetivo de que se realice una obtención de datos en el bloque A y en el tiempo desfasado se envíen las señales ya filtradas al bloque B.

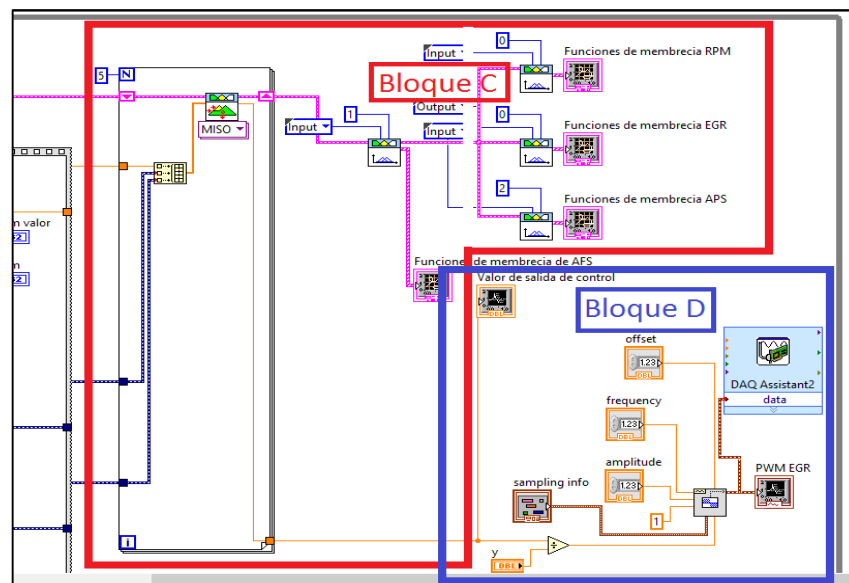


Figura 72. Estructura de bloques de funcionamiento del sistema Difuso. (C-D). Fuente: Autores.

Bloque C

En el bloque C (Figura 72), se carga el sistema difuso diseñado en la Fase 3 utilizando *FL Load Fuzzy Sytem* el cual se obtiene de: *Functions> Control and Simulation> Fuzzy Logic> FL Load Fuzzy Sytem*, este instrumento virtual es el encargado de cargar los valores de entrada, membrecías reglas, etc, de todo el sistema difuso para que luego se de el proceso de control utilizando *FL Fuzzy Controller* el cual se obtiene mediante *Functions> Control and Simulation> Fuzzy Logic> FL Fuzzy Controller*, este sirve para el control del sistema difuso y entra en un *VI For Loop* el cual se adquiere de: *Function> Structures> For Loop*, con un contador hasta 5. Todos los valores de entrada vienen de *Squence Structure*, y el valor que devuelve es procesado por el sistema difuso. Para visualizar las variaciones de las funciones de membresía se utiliza el instrumento virtual *FL Plot Variable VI*, el cual aplica a todas las funciones de membresía de entrada y a la función de membresía de salida.

Bloque D

En el Bloque D (Figura 72), se generan los pulsos cuadrados (PWM), esta será la señal de salida desde la tarjeta de adquisición de datos hacia el solenoide de la válvula EGR.

5.4.3.2.5.2. Implementación del controlador difuso en un motor Hyundai Santa Fe CRDi 2.0 Diésel.

Al completar el diseño del controlador difuso, se procede a implementar este controlador en un motor Hyundai Santa Fe CRDi 2.0 Diésel. Para lo cual se realizan conexiones en los puertos de entrada de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212 (Figura 73), las señales de los tres sensores que influyen en el funcionamiento de la válvula EGR; se desconecta los pines de que reciben la señal para activar el solenoide de la válvula EGR, para conectarlos con la señal (PWM) (Figura 74) en el puerto de salida de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212.



Figura 73. Conexión de señales de entrada y salida (DAQ NI USB 6212). Fuente: Autores.

Los puertos de señales de entrada y salida se conectan a los sensores de acuerdo a la configuración de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212, establecido en el inciso 5.4.1 del presente trabajo de investigación.



Figura 74. Conexión de señal de entrada y alimentación en el solenoide de la válvula EGR.

Fuente: Autores.

Para enlazar el solenoide de la válvula EGR con el puerto de salida de señal de tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212, se realiza un circuito de conexión mediante el uso de un transistor TIP 41 (Figura 72), para que en el caso de que si en el circuito lleguen a existir caídas de tensión o sobre voltaje, no se afecte el puerto de salida de señal de la de tarjeta de adquisición de datos.

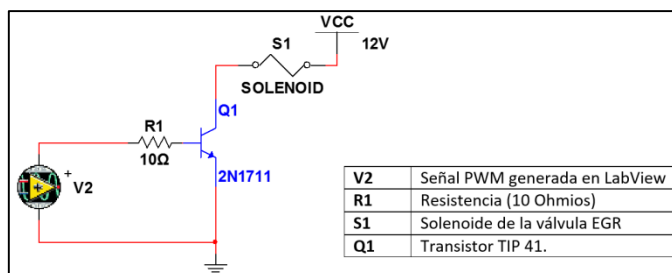


Figura 75. Circuito de protección implementado en el puerto de salida señal (DAQ NI USB 6212). Fuente: Autores.

Realizadas todas las conexiones, se procede a verificar el funcionamiento del sistema, para lo cual con el uso de un osciloscopio se verifica que los pulsos de activación del solenoide de la válvula EGR estén variando y para verificar que el solenoide se esté activando, se desconecta la cañería de entrada de vacío de aire de la válvula EGR y se conecta un vacuometro, en el cual se observa la variación de depresión dada por la activación del solenoide de la válvula EGR; estas pruebas se realizan con el motor encendido y en determinados regímenes de funcionamiento específicamente en ralentí, a 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm y 2200rpm.



Figura 76. Variación de vacío por acción del solenoide de la válvula EGR controlado por un Sistema Difuso. Fuente: Autores.

La tabla 9 indica la relación entre los porcentajes de apertura de los pulsos PWM y depresión o vacío, en diferentes condiciones de funcionamiento del motor.

Tabla 9. Tabla de relación entre pulsos PWM y Depresión.

RPM	PWM (%)	Vacio (cm/Hg)
850	40	10
1000	60	18
1500	85	22
2000	95	40
2200	85	22

5.4.3.2.5.3. Etapa de potencia.

Debido a que el solenoide de la válvula EGR trabaja con 12V y la salida de voltaje máxima de la tarjeta DAQ NI USB-6212 es de 10V, se implementa un circuito eléctrico que acondiciona la señal de salida de la DAQ, con el uso de un módulo de encendido para aumentar el voltaje de salida de dicha tarjeta.

El módulo de encendido es un dispositivo electrónico en estado sólido que contiene un circuito electrónico el enciende y apaga un bobinado primario de una bobina de encendido. Con este principio de funcionamiento del módulo, se adapta para que genere los 12 voltios que requiere el solenoide de la válvula EGR.

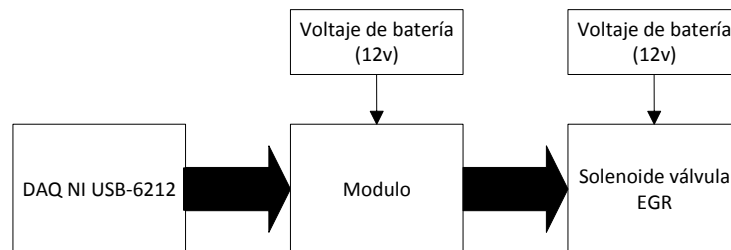


Figura 77. Etapa de potencia para Sistema de Control Difuso. Fuente: Autores.

Por lo tanto según los pines de conexión presentados en las figuras 78 y 79, se realizan las siguientes conexiones:

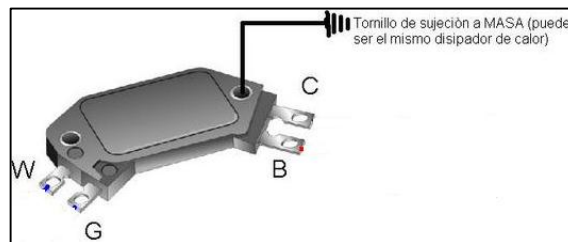


Figura 78. Pines de conexión de un módulo de encendido electrónico. Fuente: Autores.



Figura 79. Pines de conexión de un módulo de encendido electrónico. Fuente: Autores.

- W: tierra de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212.
- G: Entrada de la señal PWM proveniente del puerto de salida “Ao0” de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212.
- B: Alimentación 12v proveniente del borne positivo de la batería.
- C: Salida de señal la cual se conecta con el pin negativo del solenoide de la válvula EGR.

5.5. Medición de emisiones de óxido nitroso.

5.5.1. Estado Mecánico.

Para determinar si el motor está en condiciones normales o apropiadas de funcionamiento, se debe comprobar su estado mecánico, para lo cual se sigue el siguiente protocolo de pruebas:

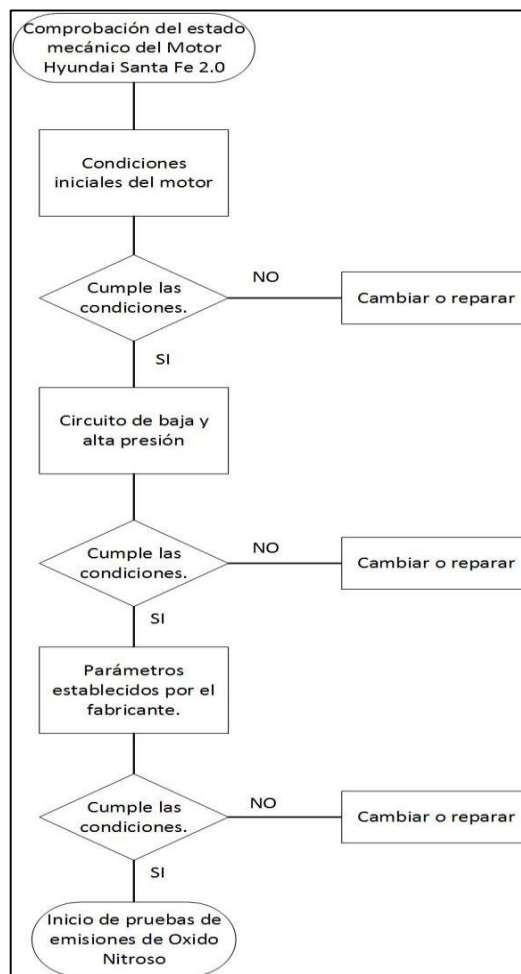


Figura 80. Protocolo de comprobación del estado mecánico del motor Hyundai Santa Fe 2.0. Fuente: Autores

Por lo tanto los pasos de revisión a seguir en cada prueba indicada por el protocolo son los siguientes:

- Condiciones iniciales del motor.
 - Nivel de combustible.
 - Nivel de aceite.
 - Nivel del refrigerante.
 - Nivel de electrolito de la batería.
 - Trampa de agua del filtro de combustible.
 - Estado del filtro de aire.
- Circuito de alta y baja presión.
 - Conexiones entre cañerías.
 - Fugas en cañerías de alta presión.
 - Fugas en cañerías de retorno de combustible.
- Parámetros establecidos por el fabricante.
 - Voltaje de alimentación de la batería ($VCC > 12.6v$)
 - No registrar códigos de fallas DTC en el escáner automotriz.
 - Valores correctos de presión de alimentación de combustible.
 - Valores correctos de volumen de retorno de los inyectores.
 - Valores de compresión de los cilindros.

Los pasos de pruebas de fallas DTC, volumen de retorno de los inyectores y compresión de cilindros, para los cuales se utiliza un escáner automotriz, se encuentran especificados en los Anexos 6, 8 y 9.

Para las pruebas de valores de presión de alimentación de combustible se siguen los siguientes pasos:

- Prueba de presión de funcionamiento de la bomba eléctrica en el circuito de baja presión:
 - Se conecta un manómetro de presión entre el filtro y la bomba de alta presión, una vez obtenidos los valores se verifica que estos se encuentren en el rango de valores establecidos en el Anexo 7. Esta prueba se realiza con el motor en marcha.
- Prueba del valor residual en el circuito de baja presión:

- Con una pinza se obtruye la cañería que permite el paso de combustible entre la bomba eléctrica y el filtro de combustible, ya que esta prueba se realiza con el motor encendido, se procede a apagarlo y posteriormente verificar si la presión se mantiene, de no ser ese el caso se procede a sustituir la bomba debido a la falta de estanqueidad en la válvula anti-retorno.
- Prueba de presión en el retorno de combustible.
- Se conecta un manómetro de presión entre la cañería de retorno de la bomba y el filtro de combustible. Esta prueba se la realiza con el motor apagado y con el motor en marcha. Una vez obtenidos los valores se verifica que los mismos se encuentren en los rangos de datos especificados en el Anexo 7.

La tabla 10, muestra los resultados de las condiciones mecánicas obtenidas en todas las pruebas.

Tabla 10. Tabla de resultados de pruebas del estado mecánico del motor Hyundai Santa Fe 2.0

PRUEBAS DEL ESTADO MECANICO DEL MOTOR HYUNDAI SANTA FE 2.0 CRDi.				
Prueba.	Valor obtenido	OK	Valores erroneos	Observaciones
Nivel de combustible		X		
Nivel del refrigerante		X		
Nivel del aceite		X		
Nivel del electrolito de la batería		X		
Trampa de agua del filtro de combustible		X		
Estado del filtro de aire		X		
Conexiones entre cañerías		X		
Fugas entre cañerías de alta presión		X		
Fugas en cañerías de retorno de combustible		X		
Voltaje de alimentación de la batería	13,2 V	X		El valor de referencia establecido por el fabricante es de 12,7V
Fallos DTC	No trouble Codes	X		
Presión de alimentación de combustible	2.13 bar	X		El valor de referencia establecido por el fabricante es de 1.5 a 3.5bar.
Presión de retorno de combustible	Motor apagado: 0.41bar. Motor encendido:	X		Valores de referencia: Motor apagado: 0.2-0.9bar. Motor encendido: Max 1.2bar
Volumen de retorno de los inyectores	Cilindros 1 y 4: 0.84 mm ³ . Cilindros 2 y 3: 0.89 mm ³	X		La cantidad de retorno de combustible debe estar dentro de un rango de ± 2 mm ³
Compresión de los cilindros.	Presión de compresión por cilindro: 29.41 bar. Porcentaje de variación entre cilindros: 2%	X		Valores permisibles de compresión del motor: Limite entre cilindros 1 bar.

Una vez comprobado que el motor se encuentra en óptimas condiciones para las diferentes pruebas se procede a realizar las diferentes mediciones de óxidos nitrosos, para lo que se siguen diferentes procedimientos, que se explican a continuación.

5.5.2. Procedimientos de medición de emisiones de Óxido Nitroso.

Para la determinación de concentración de emisiones de óxidos nitrosos en los gases de escape se sigue el procedimiento de medición, establecido en el inciso 5.4 de la normativa ecuatoriana NTE INEN 2203 debido a que las pruebas fueron realizadas con el motor estático en condiciones de marcha mínima o ralentí, así como también se hace referencia a ciertos pasos para el procedimiento de revisión, que establece la normativa ecuatoriana NTE INEN 2202, ya que las pruebas se realizaron con el motor en aceleración libre; estos procedimientos de revisión nos indican que:

Procedimiento de medición en condiciones de marcha mínima o ralentí (NTE INEN 2203):

- Antes de la prueba, realizar las verificaciones siguientes:
 - Someter al equipo a un período de calentamiento y estabilización, según las especificaciones del fabricante.
 - Retirar todo material en forma de partículas y eliminar toda sustancia extraña o agua, que se hayan acumulado en la sonda de prueba y que puedan alterar las lecturas de la muestra.
 - Revisar que la transmisión del vehículo esté en neutro (transmisión manual) o parqueo (transmisión automática).
 - Revisar que el control manual del ahogador (choque), no se encuentre en operación, y que los accesorios del vehículo (luces, aire acondicionado, etc.), estén apagados.
 - Revisar en el vehículo que el sistema de escape se encuentre en perfectas condiciones de funcionamiento y sin ninguna salida adicional a las del diseño que provoque dilución de los gases de escape o fugas de los mismos. Las salidas adicionales a las contempladas en el diseño original

no deben ser aceptadas, aunque éstas se encuentren bloqueadas al momento de la prueba.

- Si el vehículo no cumple con las condiciones establecidas en el paso anterior, la prueba no se debe realizar hasta que se corrijan aquellas.
- Revisar que el nivel de aceite en el cárter esté entre el mínimo y máximo recomendado por el fabricante, con el motor apagado y el vehículo en posición horizontal.
- Encender el motor del vehículo y verificar que se encuentre a la temperatura normal de operación.

➤ Medición

- Conectar el tacómetro del equipo de medición al sistema de encendido del motor y verificar las condiciones de marcha mínima o "ralentí".
- Con el motor a temperatura normal de operación y en condición de marcha mínima o "ralentí", introducir la sonda de prueba en el punto de salida del sistema de escape del vehículo. Tener la seguridad de que la sonda permanezca fija dentro del sistema de escape mientras dure la prueba.
- Esperar el tiempo de respuesta del equipo de medición dado por cada fabricante.
- Imprimir las lecturas estabilizadas de las emisiones medidas.
- Si, por diseño, el vehículo tiene doble sistema de escape, medir por separado cada salida. El valor del resultado final será la mayor lectura registrada.

Procedimiento de medición en condiciones de aceleración libre (NTE INEN 2202):

➤ Antes de la prueba.

- Verificar que el sistema de escape del vehículo se encuentre en perfectas condiciones de funcionamiento y sin ninguna salida adicional a las del diseño, que provoque dilución de los gases de escape o fugas de los mismos. Las salidas adicionales a las contempladas en el diseño original no deben ser aceptadas, aunque éstas se encuentren bloqueadas al momento de la prueba.

- Verificar que el nivel de aceite en el cárter del motor del vehículo esté entre el mínimo y el máximo recomendado por el fabricante del vehículo, con el motor apagado y el vehículo en posición horizontal.
- Verificar que el motor del vehículo se encuentre en la temperatura normal de operación.
- Verificar que la transmisión del vehículo se encuentre en neutro (transmisión manual) o en parqueo (transmisión automática).
- Si el vehículo no cumple con las condiciones determinadas anteriormente, la prueba no se debe realizar, hasta que se corrijan las fallas correspondientes.
- Someter al equipo de medición a un período de calentamiento y estabilización, según las especificaciones del fabricante.
- Verificar que se haya realizado el proceso de auto calibración en el equipo.
- Verificar que el analizador de gases marque cero en la lectura.
 - Medición
- Verificar que no exista ningún impedimento físico para el libre movimiento del acelerador.
- Con el motor funcionando en "ralentí", realizar por lo menos tres aceleraciones consecutivas, desde la posición de "ralenti" hasta la posición de máximas revoluciones, con el fin de limpiar el tubo de escape.
- Conectar la sonda de prueba a la salida del sistema de escape del vehículo.
- Aplicar aceleración libre al vehículo y permitir que el motor regrese a condición de "ralentí".
- Repetir lo indicado en el paso anterior, por lo menos seis veces, consecutivamente.
- En cada ciclo, registrar el valor del porcentaje de opacidad máximo obtenido. No se deben tener en cuenta los valores leídos mientras el motor está en marcha mínima, después de cada aceleración.
- Para el resultado final, considerar como mínimo tres lecturas tomadas en estado estable, es decir, cuando al menos estas tres lecturas consecutivas

se sitúen dentro de un rango del 10 %, y no formen una secuencia decreciente.

Los ciclos de prueba establecidos para el procedimiento de medición en condiciones de aceleración libre son:

- 1000rpm.
- 1500rpm.
- 2000rpm.
- 2200rpm.

Una vez obtenidos todos los datos de emisiones de óxido nitroso en diferentes condiciones del motor se procede a tabular los datos, los cuales posteriormente serán analizados.

5.5.3. Emisiones de óxido nitroso de un motor Hyundai Santa Fe en condiciones normales de funcionamiento.

Emisiones en condiciones de funcionamiento del motor en ralentí:

Tabla 11. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) en Ralentí. Fuente: Autores.

Ralentí							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	72	74	73	73	73	72	72
10	72	73	74	72	73	73	72
20	72	73	73	72	73	73	72
30	72	72	73	72	69	73	72
40	72	72	72	72	72	73	72
50	72	72	72	72	72	72	72
60	72	72	72	72	72	72	72

Emissiones en condiciones de funcionamiento del motor a 1000rpm:

Tabla 12. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1000rpm. Fuente: Autores.

1000rpm							
NO(ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	66	67	66	57	58	59	59
10	63	64	66	58	58	59	59
20	56	62	57	58	57	57	58
30	54	54	53	57	58	58	58
40	53	53	56	58	58	58	58
50	53	53	56	58	58	58	58
60	53	53	56	58	58	58	58

Emissiones en condiciones de funcionamiento del motor a 1500rpm:

Tabla 13. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1500rpm. Fuente: Autores.

1500rpm							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	35	54	56	55	55	56	57
10	35	54	53	55	49	55	55
20	33	54	46	55	40	55	55
30	33	42	39	40	38	40	40
40	32	38	38	38	38	38	38
50	32	38	38	38	38	38	38
60	32	38	38	38	38	38	38

Emissiones en condiciones de funcionamiento del motor a 2000rpm:

Tabla 14. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2000rpm. Fuente: Autores.

2000rpm							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	29	37	37	36	37	36	37
10	25	36	37	35	36	36	37
20	23	36	36	35	36	36	36
30	25	35	35	35	35	35	35
40	25	35	35	35	35	35	35
50	22	35	35	35	35	35	35
60	23	35	35	35	35	35	35

Emisiones en condiciones de funcionamiento del motor a 2200rpm:

Tabla 15. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2200rpm. Fuente: Autores.

2200rpm							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	23	25	24	23	23	24	25
10	23	25	23	23	23	24	23
20	23	24	23	23	23	24	23
30	23	23	23	23	23	23	23
40	23	23	23	23	23	23	23
50	23	23	23	23	23	23	23
60	23	22	23	23	23	23	23

5.5.4. Emisiones de óxido nitroso de un motor Hyundai Santa Fe con un controlador difuso de la válvula EGR.

Emisiones en condiciones de funcionamiento del motor en ralentí y con un controlador difuso de la válvula EGR implementado:

Tabla 16. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) en ralentí con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor. Fuente: Autores.

Ralentí							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	29	29	23	23	23	24	24
10	24	27	23	23	23	24	24
20	24	23	23	23	23	23	24
30	23	23	23	23	23	23	24
40	23	23	23	23	23	23	23
50	23	23	23	23	23	23	23
60	23	23	23	23	23	23	23

Emisiones en condiciones de funcionamiento del motor a 1000rpm y con un controlador difuso de la válvula EGR implementado.

Tabla 17. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1000rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor. Fuente: Autores.

1000rpm							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	14	13	16	17	13	15	15
10	13	13	16	15	12	15	14
20	13	13	14	15	12	13	13
30	12	12	12	13	12	13	12
40	12	12	12	12	13	12	12
50	12	12	12	12	12	12	12
60	12	12	12	12	12	12	12

Emisiones en condiciones de funcionamiento del motor a 1500rpm y con un controlador difuso de la válvula EGR implementado

Tabla 18. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 1500rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor. Fuente: Autores.

1500rpm							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	18	20	17	15	17	16	17
10	17	18	17	15	16	16	16
20	15	17	15	15	16	15	15
30	15	15	15	15	15	15	15
40	15	15	15	15	15	15	15
50	15	15	15	15	15	15	15
60	15	15	15	15	15	15	15

Emisiones en condiciones de funcionamiento del motor a 2000rpm y con un controlador difuso de la válvula EGR implementado

Tabla 19. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2000rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor. Fuente: Autores.

2000rpm							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	7	8	8	8	9	8	7
10	6	8	8	6	7	8	7
20	6	7	6	6	7	8	7
30	6	6	6	6	6	6	6
40	6	6	6	6	6	6	6
50	6	6	6	6	6	6	6
60	6	6	6	6	6	6	6

Emisiones en condiciones de funcionamiento del motor a 2200rpm y con un controlador difuso de la válvula EGR implementado

Tabla 20. Tabla de emisiones de Óxido Nitroso (NO) a 2200rpm con un controlador difuso de la válvula EGR implementado en el motor. Fuente: Autores.

2200rpm							
NO (ppm)							
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
0	4	6	4	3	3	3	3
10	4	5	3	3	3	2	3
20	2	5	3	2	3	2	3
30	2	3	2	2	2	2	3
40	2	2	2	2	2	2	2
50	2	2	2	2	2	2	2
60	2	2	2	2	2	2	2

6. Análisis de resultados.

Las muestras han sido tomadas cada 10 segundos en un tiempo total de 1 minuto, haciendo referencia a la normativa NTE INEN 2202 se verifico que entre las muestras no existían variaciones superiores al 10% por lo que tiempo establecido fue de un minuto, con un total de 7 pruebas por condición de funcionamiento del motor, lo cual aplica para el motor en funcionamiento normal así como para el motor implementado con un controlador difuso de la válvula EGR.

6.1. Señales de entrada Filtradas.

Con el uso de filtros ofrecidos por LabView, se elimina la presencia de perturbaciones en las diferentes señales de entrada de los sensores AFS (Figura 81) y APS (Figura 82), lo cual evita que el sistema difuso sea inestable debido a la presencia de valores que no se mantengan o no tengan una variación ordenada en el instante en el que el sistema las procesa.

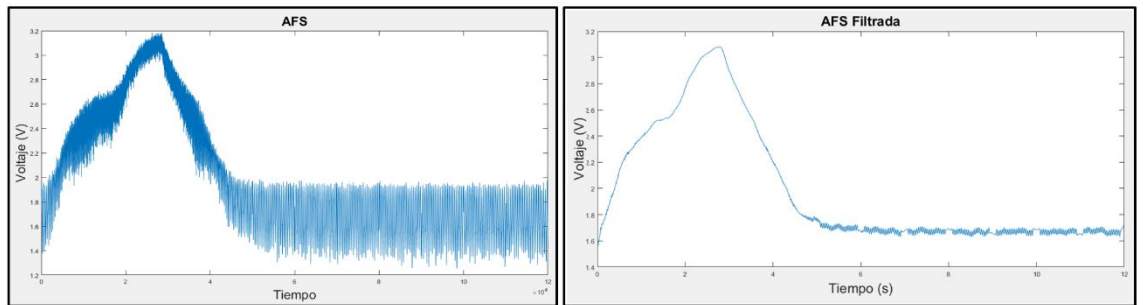


Figura 81. Señal sensor AFS sin filtro/ Señal sensor AFS filtrada. Fuente: Autores.

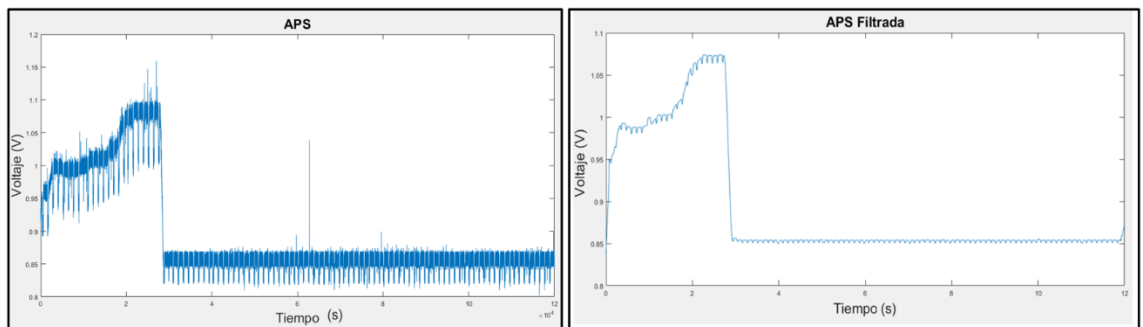


Figura 82. Señal sensor APS sin filtro/ Señal sensor APS filtrada. Fuente: Autores.

En el caso de la señal del sensor CKP, lo que se modifica es su voltaje pico (12V), debido a que esta señal debe ser transformada a valores numéricos de rpm previo a ser ingreso al sistema difuso, se utiliza otro sistema de proceso de señal explicado en el inciso 5.4.3.2.2.2 del presente trabajo de investigación, por lo que únicamente la señal del sensor CKP en este procedimiento queda como se muestra la figura 83, en la cual su valor pico máximo es de 2,4V.

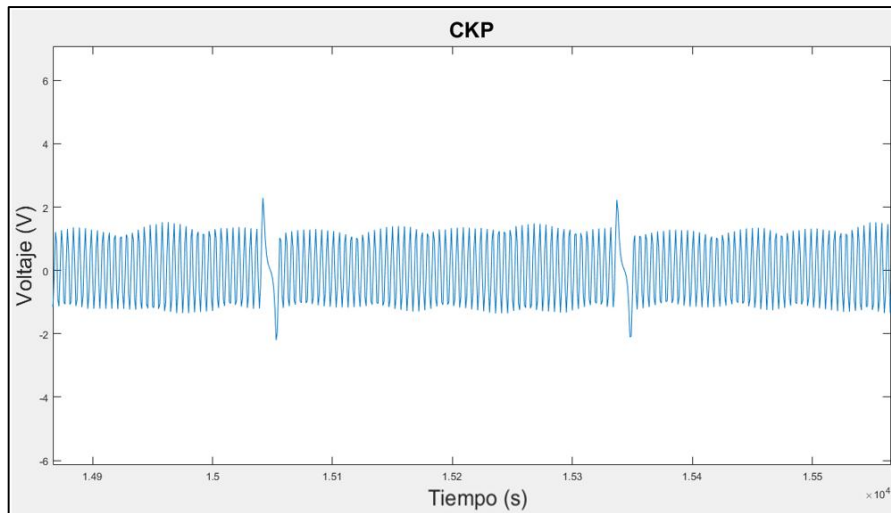


Figura 83. Señal del sensor CKP. Fuente: Autores.

6.2. Resultados de respuesta del sistema difuso respecto a diferentes condiciones de funcionamiento del motor Hyundai Santa Fe 2.0 CRDi.

Para las diferentes pruebas, se toman los valores de las señales de los sensores que influyen en el funcionamiento de la válvula EGR clasificados, por lo tanto con el sistema difuso diseñado se obtiene los siguientes porcentajes de respuesta en la apertura de la válvula EGR.

Tabla 21. Tabla de valores de prueba del Sistema Difuso.

Situación de funcionamiento	CKP	AFS	APS	EGR
1. Relanti	681	1,45	0,733	30,713
2. Subida	1763	2,935	2,678	95
	3000	3	2,7	5
3. Bajada	1763	2,935	0,733	95
	2845	4,42	0,733	5
4. Plano	1763	2,935	1,7055	95
5. Aceleración	2845	1,45	2,678	25,76
6. Desaceleración	2,935	4,42	0,733	5

- Ralentí: el porcentaje de apertura de la válvula EGR es el correcto ya que el sistema no está permitiendo que se abra por completo la válvula lo cual conllevaría a que el motor tenga ciertas vibraciones debido a la pérdida de

potencia, ni tampoco la válvula estará cerrada lo cual significaría que el motor está emitiendo en un 100% óxido nitroso al medio ambiente, es decir el sistema responde con un porcentaje de apertura coherente cuando el motor se encuentra en ralentí.

- Subida 1: se considera una subida con una pendiente del 2% al 3%, el sistema responde correctamente ya que la válvula estará abierta en su totalidad, reduciendo así las emisiones de óxido nitroso al medio ambiente.
- Subida 2: se considera una subida pronunciada del 4% al 6%, el sistema responde correctamente cerrando por completo la válvula EGR debido a que el motor necesita desarrollar potencia.
- Bajada 1: se considera una bajada con una pendiente no pronunciada del 2% al 3%, por lo que el sistema responde correctamente abriendo por completo la válvula EGR, reduciendo notablemente las emisiones de óxidos nitrosos.
- Bajada 2: según los valores observados de CKP y AFS el motor está descendiendo a una mayor velocidad, por lo que el sistema cierra por completo la válvula EGR para ayudar a un mejor desarrollo de potencia del motor.
- Plano: el sistema responde correctamente ya que activa por completo la válvula EGR, lo cual conlleva a una reducción de emisiones de óxidos nitrosos.
- Aceleración: al necesitar potencia, el sistema responde con un porcentaje de apertura bajo evitando así que el desarrollo de potencia del motor sea lento.
- Desaceleración: el sistema considera que durante este lapso se deben reestablecer los valores de activación por lo que se reinician dichos valores es decir, se da un porcentaje mínimo de apertura.

Para darle al sistema estas diferentes condiciones se hacen variaciones de las señales de entrada en el panel de prueba del diseño del sistema difuso presentado por LabView, debido a que en el banco didáctico en el que se encuentra el motor de prueba únicamente se pueden hacer pruebas estáticas.

6.3. Resultados de la variación emisiones de óxido nitroso.

Obtenidos los resultados de las emisiones de óxido nitroso, tanto en el motor en condiciones normales, como el mismo con un sistema de control difuso externo, en la figura 84 se visualiza la variación que existe entre tales condiciones; debido a que en los diferentes regímenes de funcionamiento del motor, la presión del cilindro y la mezcla aire-combustible varia, se obtienen diferentes niveles de emisiones de óxido nitroso para las diferentes condiciones de funcionamiento en las que se han tomado las muestras.

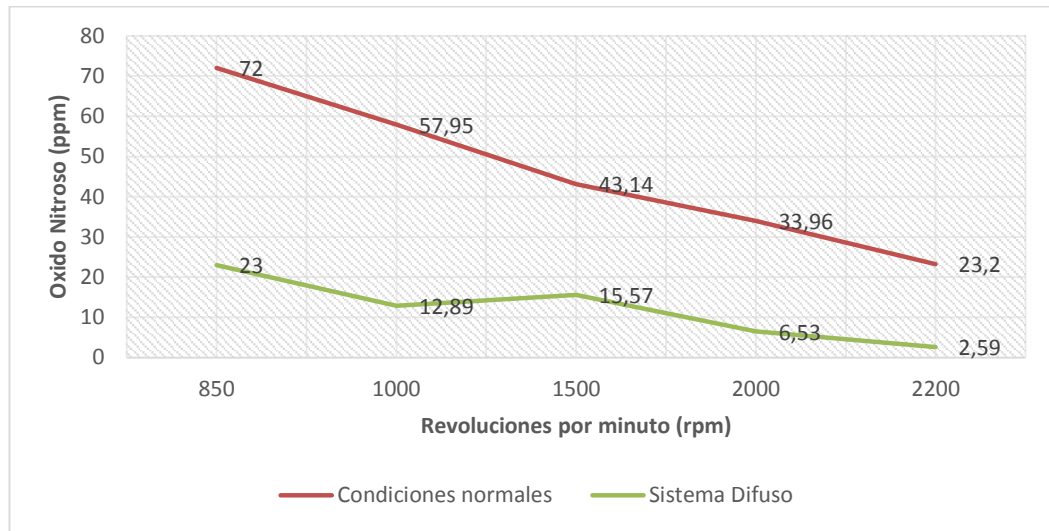


Figura 84. Variación de emisiones de óxido nitroso. Fuente: Autores.

La tabla 22 muestra los diferentes porcentajes de variación en las emisiones de óxido nitroso, entre el motor en condiciones normales y con un controlador difuso, de acuerdo a los resultados de porcentaje obtenidos se establece que mediante un controlador difuso de la válvula EGR se consigue que de manera general se disminuya un 75,86% de emisiones de óxido nitroso, siendo este un porcentaje de variación notable para que se considere a este sistema difuso un sistema apto para reducir emisiones de óxido nitroso al medio ambiente.

Tabla 22. Tabla de porcentajes de variación de emisiones de óxido Nitroso. Fuente: Autores.

RPM	Emisiones NO (ppm), motor en condiciones normales	Emisiones NO (ppm), motor con un controlador Difuso.	Porcentaje de variación.
850	72	23	68,05%
1000	57,95	12,89	77,75%
1500	43,14	15,57	63,90%
2000	33,96	6,53	80,77%
2200	23,2	2,59	88,83%
		Promedio	75,86%

Los valores de variación en las emisiones de Óxidos Nitrosos en ppm (partículas por millón), en diferentes condiciones de funcionamiento del motor así como el mismo en condiciones normales como el motor con un controlador difuso de la válvula EGR, se visualizan en la figura 85

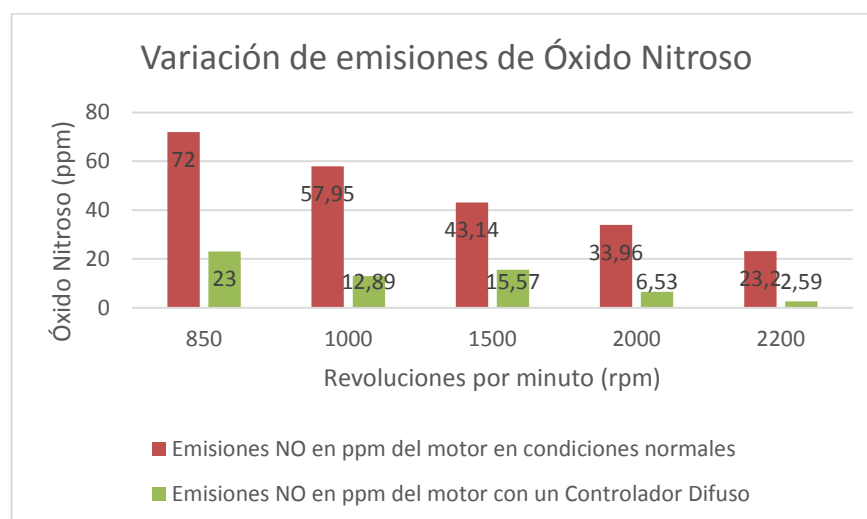


Figura 85. Variación de emisiones de Óxido Nitroso en diferentes condiciones de funcionamiento del motor. Fuente: Autores.

6.4. Análisis de varianza (ANOVA).

La técnica conocida como análisis de varianza (ANOVA), permite probar la significancia de las diferencias entre más de dos medias maestras. Haciendo uso del análisis de varianza, se puede hacer inferencias acerca de si nuestras muestras se tomaron de poblaciones que tienen la misma media [24].

Por lo tanto se emplea esta técnica para la comparación de valores de óxidos nitrosos emitidos por un motor en condiciones normales de funcionamiento y el mismo motor implementado con un controlador difuso de la válvula EGR, para lograr así la comparación de las medias entre las dos muestras.

Para una comparación en los diferentes análisis de muestras obtenidas, se plantean las siguientes hipótesis:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2$$

$$H_A = \mu_1 \neq \mu_2$$

En donde:

H_0 = Hipótesis nula, las medias de las muestras coinciden

H_A = Hipótesis alternativa, las medias de las muestras no son iguales.

μ = media de las diferentes muestras.

6.4.1. Análisis de muestras obtenidas.

La figura 83, 84 y 85 muestran los histogramas de la distribución normal de los valores de las muestras, en diferentes condiciones de funcionamiento del motor (ralentí, 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm, 2200rpm), en los cuales los valores tienen simetría a cero y tienen forma de campana, lo cual demuestra que las muestras fueron correctamente obtenidas.

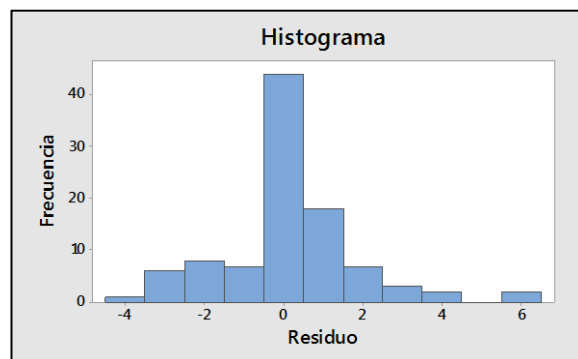


Figura 86. Histograma de distribución normal de probabilidad (Ralentí). Fuente: Autores.

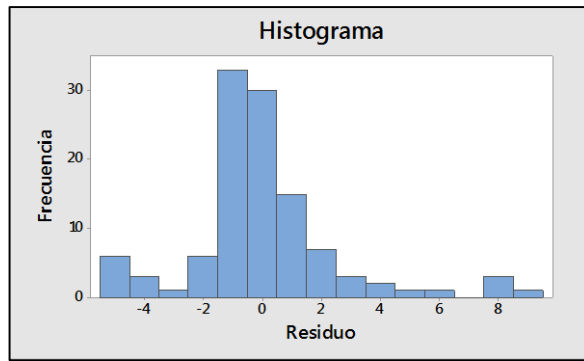


Figura 87. Histograma de distribución normal de probabilidad (1000 RPM). Fuente: Autores.

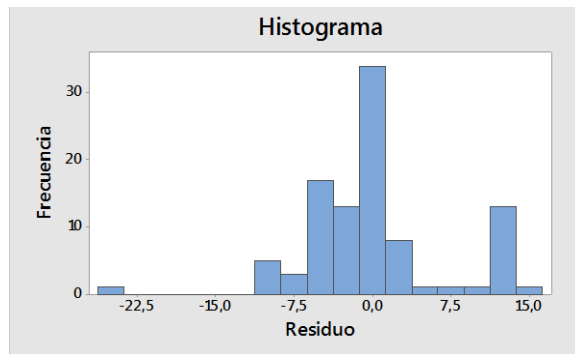


Figura 88. Histograma de distribución normal de probabilidad (1500 RPM). Fuente: Autores.

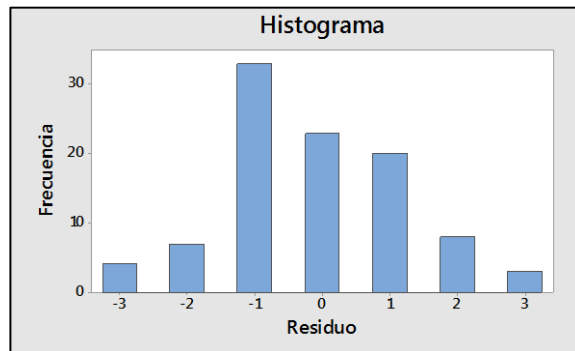


Figura 89. Histograma de distribución normal de probabilidad (2000 RPM). Fuente: Autores.

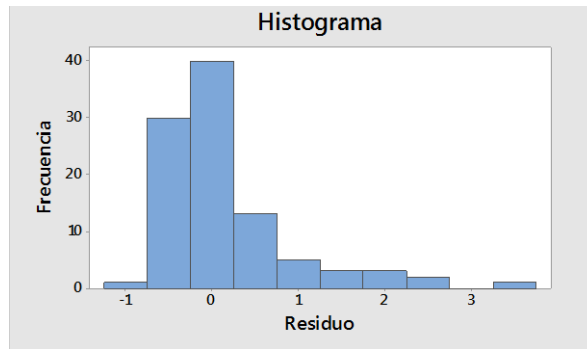


Figura 90. Histograma de distribución normal de probabilidad (2200 RPM). Fuente: Autores.

Para el análisis y decisión de una hipótesis, el software de aplicación agrupa la información utilizando el método Tukey, con una confianza de 95% y presenta en las figuras 91, 92, 93 y 94 los resultados.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Ralenti	35	72,286	A
LD	35	23,514	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 91. Comparaciones en parejas de Tukey (Ralenti-LD). Fuente: Autores.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
1000RPM	35	58,057	A
LD	35	13,029	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 92. Comparaciones en parejas de Tukey (1000RPM-LD). Fuente: Autores.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
1500RPM	42	44,81	A
LD	42	15,548	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 93. Comparaciones en parejas de Tukey (1500RPM-LD). Fuente: Autores.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%			
Factor	N	Media	Agrupación
2000RPM	42	35,524	A
LD	42	6,595	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 94. Comparaciones en parejas de Tukey (2000RPM-LD). Fuente: Autores.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%			
Factor	N	Media	Agrupación
2200RPM	49	23,2041	A
LD	49	2,592	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 95. Comparaciones en parejas de Tukey (2200RPM-LD). Fuente: Autores.

De acuerdo método de Tukey si las medias no comparten una letra son significativamente diferentes, en las figuras 96, 97, 98, 99 y 100 se visualiza que los intervalos de las diferencias de las medias son diferentes de cero, en todas las pruebas realizadas, por lo que según los datos y figuras dadas por el software se concluye que la hipótesis valida en esta prueba es la hipótesis alternativa (H_A), la cual nos dice que existe una variación en la emisión de óxidos nitrosos entre el motor sin un controlador externo y el mismo motor con un controlador difuso de la válvula EGR, por lo que estadísticamente se comprueba que el controlador difuso implementado en el vehículo incide notablemente en la reducción de las emisiones de óxido nitroso.

En condiciones de funcionamiento en ralentí, la figura 96 indica el índice de confianza de Tukey ajustado a un intervalo de confianza del 95%, de manera que en este análisis, la línea entre cortada no se interseca con la línea del intervalo de confianza, por lo que por este método se establece que las medias de las muestras son significativamente diferentes.

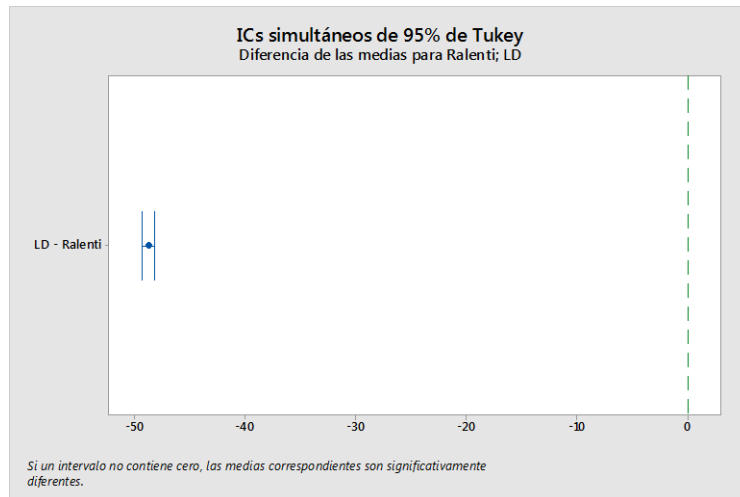


Figura 96. ICs simultáneos de 95% de Tukey (Ralenti). Fuente: Autores.

En condiciones de funcionamiento del motor a 1000rpm, la figura 97 indica el índice de confianza de Tukey ajustado a un intervalo de confianza del 95%, el cual en este caso es más amplio. En este análisis se puede visualizar que la línea entre cortada no se interseca con la línea del intervalo de confianza, por lo que por este método se establece que las medias de las muestras (LD – 1000rpm) son significativamente diferentes.

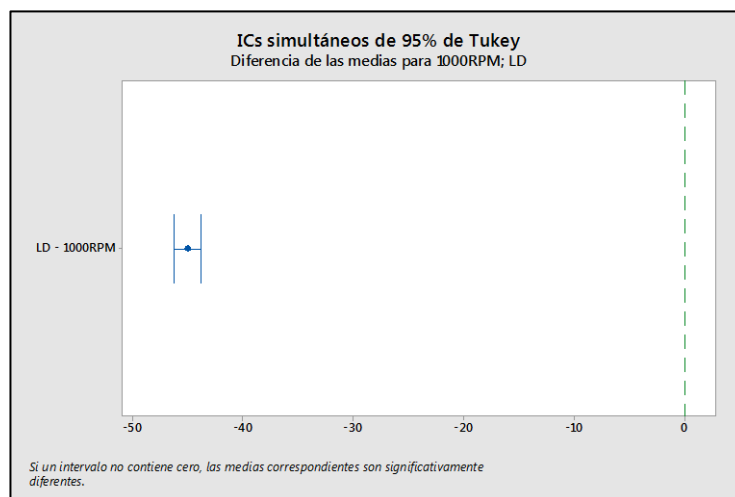


Figura 97. ICs simultáneos de 95% de Tukey (1000 RPM). Fuente: Autores.

En condiciones de funcionamiento del motor a 1500rpm, la figura 98 indica el índice de confianza de Tukey ajustado a un intervalo de confianza del 95%, el cual en este caso es mucho más amplio que la prueba del motor a 1000rpm. En este análisis se puede visualizar que la línea entre cortada no se interseca con la

línea del intervalo de confianza, por lo que por este método se establece que las medias de las muestras (LD – 1500rpm) son significativamente diferentes.

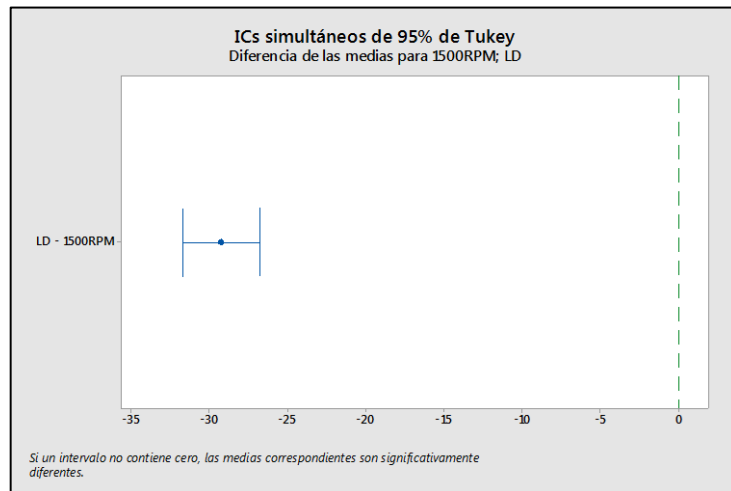


Figura 98. ICs simultáneos de 95% de Tukey (1500 RPM). Fuente: Autores.

En condiciones de funcionamiento del motor a 2000 rpm, mostrada en las figuras 99, indica el índice de confianza de Tukey ajustado a un intervalo de confianza el cual en este caso su amplitud se reduce en comparación con la prueba de 1500 rpm. En este análisis se puede visualizar que la línea entre cortada no se interseca con la línea del intervalo de confianza, por lo que por este método se establece que las medias de las muestras (LD – 2000rpm) y son significativamente diferentes.

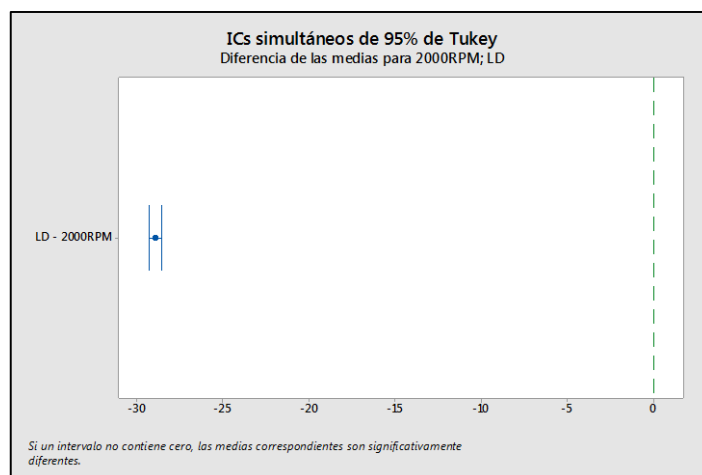


Figura 99. ICs simultáneos de 95% de Tukey (2000 RPM). Fuente: Autores.

En condiciones de funcionamiento del motor a 2200 rpm, mostrada en las figuras 100, indica el índice de confianza de Tukey ajustado a un intervalo de confianza del 95%, el cual en este caso su amplitud es parecida a la amplitud de la prueba del motor a 2000rpm. En este análisis se puede visualizar que la línea entre cortada no se interseca con la línea del intervalo de confianza, por lo que por este método se establece que las medias de las muestras (LD – 2200rpm) y son significativamente diferentes.

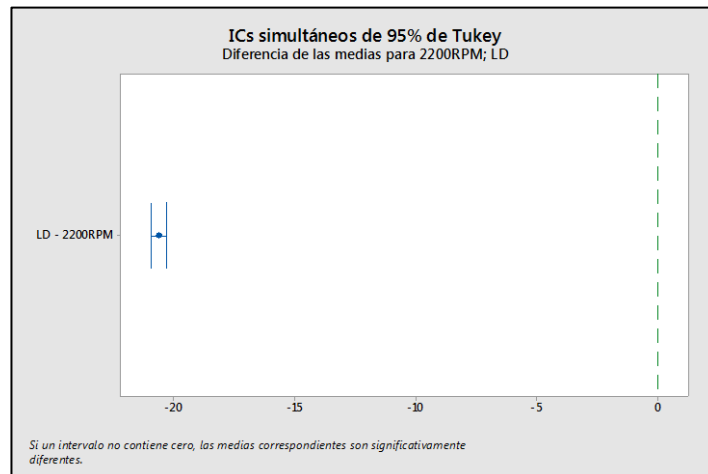


Figura 100. ICs simultáneos de 95% de Tukey (2200 RPM). Fuente: Autores.

De igual forma mediante las figuras 91, 92, 93, 94 y 95, se puede constatar la diferencia de las medias existentes entre los valores de emisiones de óxidos nitrosos, del motor en diferentes condiciones de funcionamiento y el mismo en diferentes condiciones de funcionamiento pero con un controlador difuso externo.

La grafica de intervalos indica la diferencia que existe entre los promedios de las pruebas, en las diferentes condiciones de funcionamiento del motor, las columnas consideras son:

Normal: Indica los valores promedio de emisiones de Óxidos Nitrosos por parte del motor en condiciones normales de funcionamiento.

LD: Indica los valores promedio de emisiones de Óxidos Nitrosos por parte del motor que cuenta con un controlador difuso de la válvula EGR.

La figura 101, indica diferencias significativas entre los grupos de prueba, Normal y LD, las cuales fueron tomadas del motor en condiciones de funcionamiento en ralentí. Existe una diferencia de 50 ppm entre las medias de estas dos pruebas, lo cual representa una disminución de óxidos nitrosos en un 68,05%, la diferencia entre las medias es significativa ya que los intervalos no se superponen.

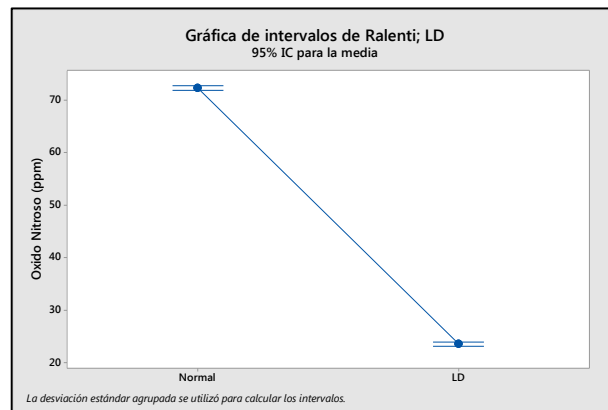


Figura 101. Grafica de intervalos (Ralentí-LD). Fuente: Autores.

En condiciones de funcionamiento del motor a 1000rpm, en la figura 102 se puede visualizar los valores de sus medias, que son de 58 en normal y 13 en LD, es decir con un controlador difuso las emisiones de óxidos nitrosos al medio ambiente disminuyeron en 43 ppm valor que es la diferencia entre las dos medias, existe una diferencia significativa ya que los intervalos no se superponen

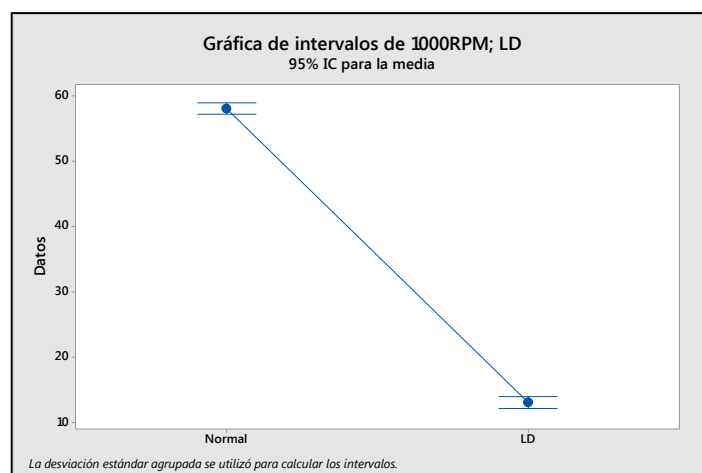


Figura 102. Grafica de intervalos (1000-LD). Fuente: Autores.

En condiciones de funcionamiento del motor a 1500rpm, en la figura 102 se puede visualizar los valores de sus medias, las cuales tienen un rango de valores más amplio que en las anteriores pruebas, pero existe una diferencia significativa ya que los intervalos no se superponen, en este caso la disminución de óxido nítrico es el 63,90%.

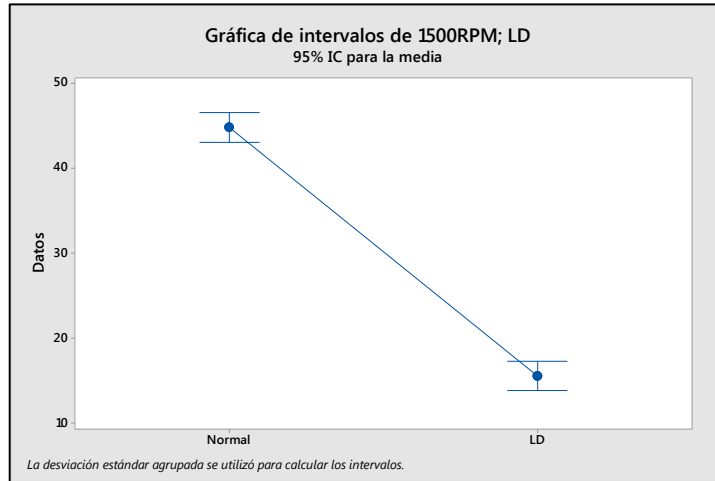


Figura 103. Grafica de intervalos (1500rpm-LD). Fuente: Autores.

En condiciones de funcionamiento del motor a 2000rpm y 2200rpm, mostradas en las figuras 104 y 105 se puede visualizar que los valores de sus medias disminuyen, por lo que sus intervalos de promedios son pequeños y no se interponen, estableciendo así una diferencia significativa entre las pruebas “Normal” y “LD”, existiendo una disminución de óxidos nítricos en un 80,77% a 2000 rpm y en un 88,83% a 2200 rpm.

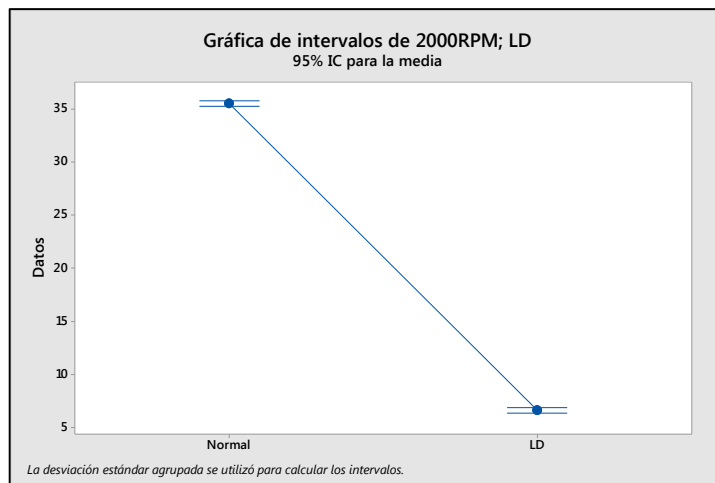


Figura 104. Grafica de intervalos (2000rpm-LD). Fuente: Autores.

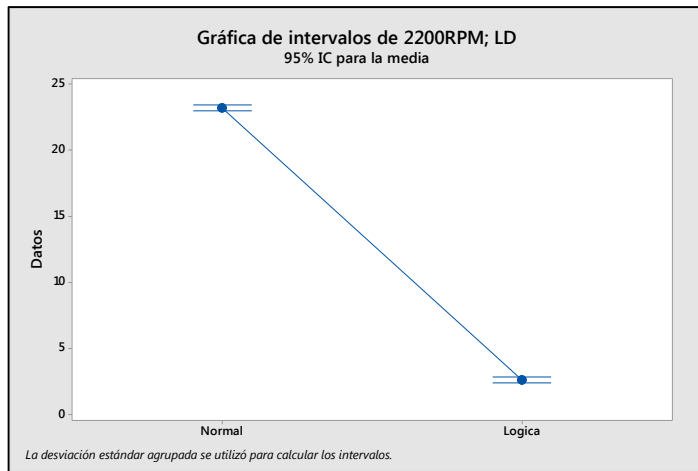


Figura 105. Grafica de intervalos (2200rpm-LD). Fuente: Autores.

7. CONCLUSIONES.

- Como conclusión principal se establece que el control difuso de la válvula EGR, es aplicable para la variación de emisiones de Óxidos Nitrosos en un motor Hyundai Santa Fe 2.0 CRDi, ya que con este controlador se ha disminuido un 68,05% de emisiones en ralentí y un 88,83% a 2200rpm (Figura 106).

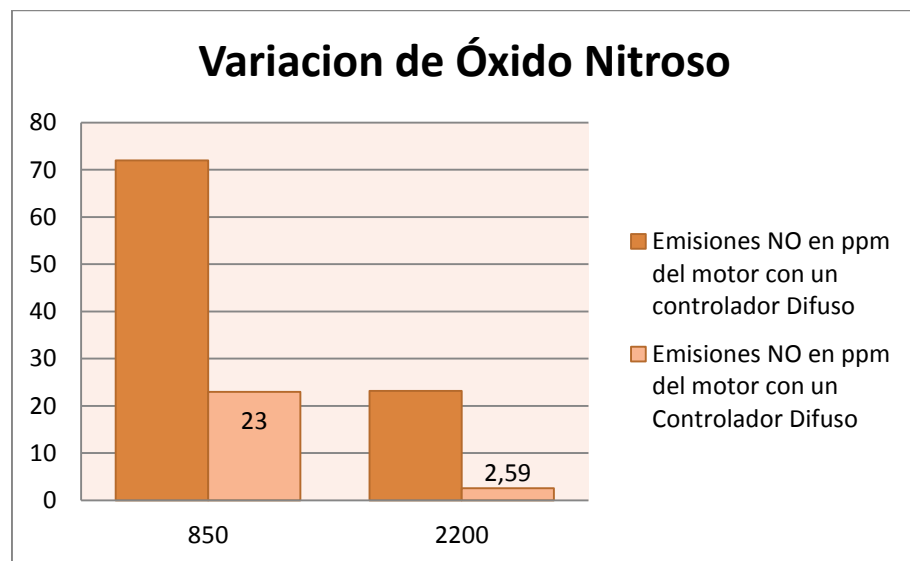


Figura 106. Variación de óxidos nitroso en condiciones de ralentí y 2200rpm. Fuente: Autores.

- El ambiente virtual que brinda LabView es muy favorable para el diseño de sistemas difusos, ya que minimiza la programación con la herramienta Fuzzy System Designer que nos ofrece el programada.
- Desde el punto de vista de un sistema no lineal, el sistema de control difuso presenta una gran ventaja ya que permite implementar sistemas MISO y SISO, sin el uso de una matemática sofisticada.
- Se han obtenido los valores de respuesta positivos, una vez efectuado el sistema, por lo que se concluye que el hardware y software implementados trabajan de forma correcta y deseada.
- El sistema EGR trabaja generalmente con lógica clásica, debido a que se establece con dos estados, encendido o apagado, o a su vez la ECU trata de establecer valores que varíen el porcentaje de apertura de la válvula

EGR, pero que no van acorde al principio de funcionamiento del sistema EGR. Con la implementación de un sistema de lógica difusa se logra cambiar los estados de funcionamiento del sistema EGR, por un rango más amplio, que se ajusta al principio de funcionamiento del sistema EGR y del funcionamiento correcto del motor en sí.

- Los sistemas de lógica difusa pueden ser implementado en diferentes sistemas de control del motor, es decir en sistemas que dependan de muchas variables de entrada y una sola variable de salida, los cuales puedan llegar a ser procesos complejos, procesos no lineales y procesos que lleguen a carecer de modelos matemáticos simples.
- El presente proyecto de investigación puede ser implementado en diferentes tipos de motores, debido a que en la mayoría de vehículos que cuentan con sistemas EGR, el principio de funcionamiento de este sistema es el mismo.

8. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda usar la menor cantidad de funciones de membresía posibles en el diseño del sistema difuso lo cual también conlleva a tener menor cantidad de reglas, para obtener una respuesta más rápida del sistema, y un menor gasto computacional.
- Usar otro tipo de método de defusificación diferente al usado en el presente trabajo de investigación, el cual es centro de área, y otro tipo de función de membresía, para establecer que variación de respuesta tiene con tales modificaciones
- Implementar el sistema de control difuso de la válvula EGR a vehículos que tengan todos los sensores que influyen en el funcionamiento del sistema, pero que no cuenten con un sistema EGR.
- En el sistema difuso se dieron tres señales de entrada debido a que estas son las que la ECU toma como referencia para la activación de la EGR, se recomienda que se realice un sistema difuso más complejo con más entradas y también un sistema más sencillo con menos entradas tomando en cuenta diferentes sensores, para determinar si da mejores resultados en la disminución de Óxidos Nitrosos.

- Se recomienda instalar este controlador en un vehículo, y realizar pruebas de carretera para observar el comportamiento de todos los componentes de gases de escape así como también el efecto que tiene en el rendimiento de potencia y de consumo de energía.
- Se recomienda realizar el mismo sistema difuso con un software de programación diferente a LabView como es MatLab y con la tarjeta de adquisición de datos Arduino para observar si existen mejoras en los resultados.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1]. Cabrera, P.,(2013). “*Aplicación de la medida de NOx para el control de motores diésel sobrealimentados*”. Universidad Politecnica de Valencia. Valencia, España.
- [2]. López, J. M., Jiménez, F., Aparicio, F. and Flores, N. (2009). *On-road emissions from urban buses with SCR + Urea and EGR + D F systems using diesel and biodiesel. Transportation research*, art D, 14, 1-5.
- [3]. Hernández, L. (2006). “Predicción y optimización de emisiones y consumo mediante redes neuronales en motores diésel”. España, Barcelona: Reverte S.A.
- [4]. Castillejo., A.,(2014). “*Sistemas de inyección en Motores Diésel*”. Uniersidad de Sevilla. Sevilla, España.
- [5]. Coral, F. (2013). “*Diseño e implementación de un bando de pruebas de inyectores de vehículos a Diésel CRDI para la escuela de ingeniería automotriz*”. Universidad Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador.
- [6]. DENSO. (2005). *Service manual common rail system HP3*. Thailandia: Denso Corporation.
- [7]. BOSCH. (1999). *Control electrónico del motor para motores Diesel: Sistema de inyección de acumulador Common Rail, Diesel*. Instrucción técnica.
- [8]. Pla, B. (2009). “*Análisis del proceso de recirculación de los gases de escape de baja presión en motores Diésel sobrealimentados*”. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [9]. CONEVYT, (s.f). *Válvula EGR y sensor de posición*. Obtenido de http://www.conevyt.org.mx/educhamba/guias_emprendizaje/valvula_EGR.pdf.
- [10]. Gonzales, C. (s.f). Técnicas de Softcomputing. Lógica difusa (*Una introducción practica*), 7-11.
- [11]. Martinez del Brio, B., Sanz, A., (2007), “*Redes neuronales y sistemas borrosos*”, Madrid, España: RA-MA.

- [12]. Carranco, C., Celi, C., (2010), “*Desarrollo de un sistema HMI/SCADA, diseñado con logica difusa e implementado en un prototipo de prueba*”, Universidad Politecnica Salesiana. Quito, Ecuador.
- [13]. Pineda, M., Vivas, P.,(2008), “*Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos; Escuela Politécnica Nacional*”, Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- [14]. Ortiz, F.,(2004), “*Modelado y control PD-Difuso en tiempo real para el sistema barra-esfera*”. Instituto Politécnico Nacional. México, Df, México.
- [15]. Duarte, O., (s.f), “*Sistemas de logica difusa: Fundamentos*”. Universidad del Cauca. Cauca, Colombia.
- [16]. Passino, K., Yurkovich, S, (1998), “*Fuzzy Control*”. The Ohio State University. Adison Wesley.
- [17]. Jimenez, L., (2000), “*Algunas aplicaciones de la logica difusa a teoria de control*”, Instituto Politecnico Nacional. Tijuana B.C, Mexico.
- [18]. Ojeda, L. R. (2007). MATLAB Conceptos Basicos y Programacion. *Tutorial*. Guayaquil, Ecuador.
- [19] Universidad de Catabria. (s.f.). *Servicio de informatica, Software Labview*. Obtenido de <https://sdei.unican.es/Paginas/servicios/software/Labview.aspx>
- [20]. Bermeo, A., Salazar, J. (2016). “*Optimizaciòn en la toma de muestras de distintas variables del banco dinamomètrico marca armfield modelo CM11*”. Universidad Politecnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.
- [21]. National Instruments., (2014), “*NI USB-6212*”, Obtenido de : <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207096>.
- [22]. MAHA., (s.f), “*Analizadores de gases para motores a diesel, gasolina y gas*”. Obtenido de : http://www.maha.de/cps/rde/xbcr/SID-2CFBBA99-1335CB6D/maha_de/BRO_MAHA_alle_Abgastester_ES.pdf.

- [23]. Lin, J. -j. (2011). Common Rail Direct Injection Diesel Engine in Hyundai Tucson. *2011 Automobile Maintenance Advanced Course for the Industrial Technical Instructors*.
- [24]. Levin, R., Rubin, D., (2004), “*Estadística para Administración y Economía*”, Mexico: Pearson Education.
- [25]. M.J. van Nieuwstadt, I.V.Kolvanosky, P.E. Moraal, A. Stefanopoulou., Jankovic, M, (2000). “*EGR-VGT control schemes: Experimental comparison for a: High Speed Diesel Engine*”. IEEE Control Systems Magazine.
- [26]. DAE-SUNG. (2011). Banco de Diagnostico CRDi Diesel Eng, y Sistema de control A/T Modelo: G-120212.
- [27]. Pulla, C., Barros, L., (2016), “*Análisis de las fallas del sistema de alimentación de combustible de un motor Hyundai Santa Fe 2.0 CRDi, basado en curvas de osciloscopio*”, Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador, 110-120.
- [28]. Cañizares, Jorge; Cruz, Guillermo (2008). “*Análisis de los gases de escape mediante la optimización del motor IZUSU del laboratorio de motores diesel-gasolina*”. Escuela Politécnica del Ejército. Latacunga, Ecuador.

10.ANEXOS.

ANEXO 1: Características principales del banco didáctico CRDi Diésel [14].



145	CRDi Diesel ENG, A/T, Control System Educational Training Equipment	Model No
G-3	CRDi 엔진, A/T 가변 제어진단 교육 훈련장비 (Eng, A/T.V.BU,PI)	G-120212

- It is high standard educational system of CRDi 2,000~2,200cc 4-cylinder VGT engine, 4 speed automatic transmission.(SANTA FE, TRAJET, TUCSON,etc. RV car)
- A consecutive operating system that is equipped with components such as engine electrical system fuel, cooling system, intake and exhaust system, automatic transmission, etc.
- It is manufactured as an educational structure with same condition of actual vehicle for efficient education.
- It has educational training function that controls condition of input and output by installing button diagnosis error control module to ECU, TCU circuit.
- By installation of check terminal to ECU, TCU circuit, input and output data can be measured and trained conveniently with multimeter or oscilloscope.
- It is composed as an efficient system for automotive engineer qualifying education and inspection training such as engine tune-up, exhaust gas, ignition timing, intake pipe, vacuum level, cylinder pressure, radiator, timing, fan belt, fuel, oil, electrolyte, charging, moving circuit, etc.
- Electric-control function of EOBD and instruction of diagnostic system and data can be trained through DLC and DM.
- Pressure gages are installed at P, R, N, D and L hydraulic circuits of automatic transmission to instruct operation of hydraulic circuits according to each range.
- By installing check terminal for each sensor, it is convenient to use tester and also, it protects the circuit.
- Instruments, vacuum gauge, fuel pressure gauge, voltmeter, DLC, power source jack, key, accelerate module, battery, stainless fuel tank, engine, radiator protector, fire extinguisher, a book holder etc. are installed.
- Control panel has excellent durability with aluminum plate, CNC engraver, and color.
- The model is designed and manufactured according to ISO 9001 and our company's technical spec.
- Powder-coated, 2-drawer door cabinet stainless molding, 4-wheel stand
- An user's manual and a cover

ANEXO 2: Valores de sensores y porcentaje de apertura de la válvula EGR (Plano).

AFS (mg/st)	RPM	Velocidad(km/h)	APS (mV)	APS (%)	EGR (%)
538	2845	21	204,8	41,1	5
538	2845	21	180,3	34	5
538	1645	22	180,3	34	75,1
526	1645	22	162,3	32,7	75,1
526	1777	21	162,3	32,7	75,1
375	1314	18	108,5	8	95
375	1314	18	136,8	17,4	95
395	1513	20	127,1	9,8	95
375	1561	22	127,1	9,8	95
376	1332	18	110,8	12,1	95
435	1515	11	148,1	23,7	95
484	1674	13	171,1	29,9	95
541	1976	15	264,3	41,1	95
541	2845	21	204,8	41,1	95
526	1777	24	162,3	32,7	95
474	1777	24	178,9	28,8	95
375	1314	18	108,5	8	95
375	1513	20	136,8	17,4	95

ANEXO 3: Valores de sensores y porcentaje de apertura de la válvula EGR (Pendiente de subida 2% a 5%).

MAF (mg/st)	RPM	Velocidad(km/h)	APS (mV)	APS (%)	EGR (%)
578	2156	19	249	61,6	5
401	1841	19	73,3	0	19,2
481	1469	19	148,6	26,9	19,2
627	2306	38	73,3	28,5	37
578	2156	28	248,8	61,6	39,6
548	1368	0	159	43	49,4
447	1340	10	159	43	53,4
447	1788	13	154,9	24,5	95
593	2567	35	168,6	27	95
549	2288	32	174	26,8	95
643	2046	27	144,2	20,6	95
627	2085	45	196	40,4	95
623	2215	49	209,7	45,2	95
641	2215	49	202,3	42,7	95
643	2202	50	205,3	44,1	95
607	2319	51	108,2	37,5	95
636	2227	49	108,2	37,5	95
636	2118	47	198,4	41,1	95

ANEXO 4: Valores de sensores y porcentaje de apertura de la válvula EGR (Pendiente de bajada 2% a 5%).

MAF (mg/st)	RPM	Velocidad(km/h)	APS (mV)	APS (%)	EGR (%)
375	278	28	73,3	0	5
404	2112	29	73,3	0	5
400	2137	29	73,3	0	5
363	1091	14	73,3	0	40,1
365	681	5	73,3	0	95
397	1428	19	73,3	0	95
359	1578	22	73,3	0	95
387	1042	14	73,3	0	95
360	1333	18	73,3	0	95
355	1076	15	73,3	0	95
356	697	10,4	73,3	0	95
356	888	11	73,3	0	95
362	1402	18	73,3	0	95
377	1790	24	73,3	0	95
387	1275	22	73,3	0	95
377	1273	17	73,3	0	95
365	1140	16	73,3	0	95
371	1157	15	73,3	0	95
383	1026	14	79,7	0	95
366	810	17,5	73,3	0	95
361	1018	13	73,3	0	95
300	1172	16	94,8	0,4	95
360	1062	15	73,3	0	95
356	837	11	73,3	0	95
372	1236	17	73,3	0	95
362	1685	23	73,3	0	95
375	1855	25	73,3	0	95

ANEXO 5: VI completo del Sistema Difuso diseñado. Fuente: Autores.

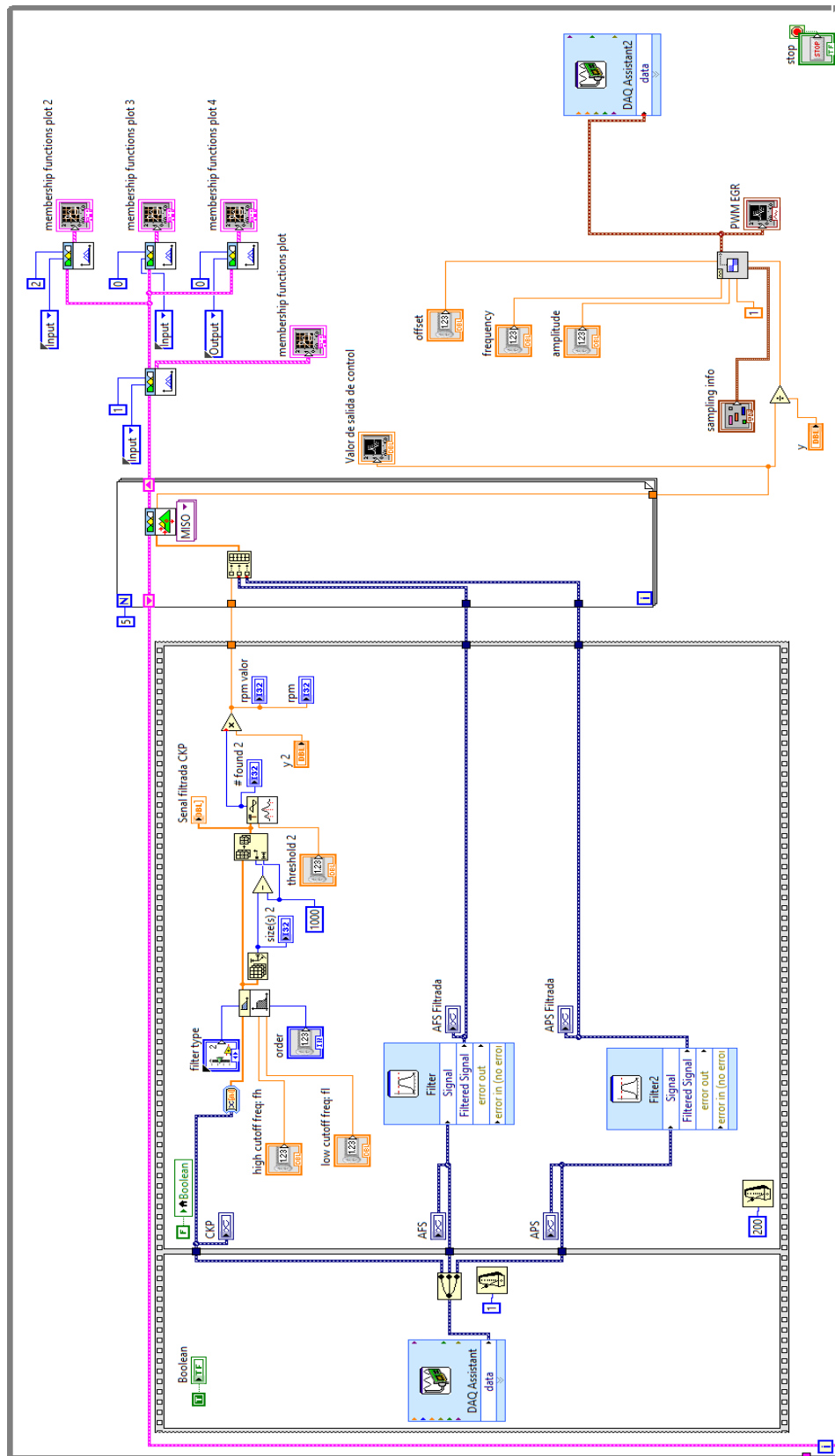


Figura 107. VI completo del Sistema Difuso diseñado. Fuente: Autores.

ANEXO 6: conexión de la ECM con el escáner Carman VG [27].

- Primero, aparece esta pantalla indicando las diferentes opciones que se puede realizar en el escáner. Escoger la opción “Diagnostico del Vehículo”.



- Seleccionar la opción “Vehículo Diagnostico”.



- Escoger la marca del vehículo, en este caso HYUNDAI, KIA.



- Una vez escogido la marca del vehículo en este caso es HYUNDAI GENERAL EXPORT.



- Seleccionar el modelo del vehículo SANTA FE 01-05.



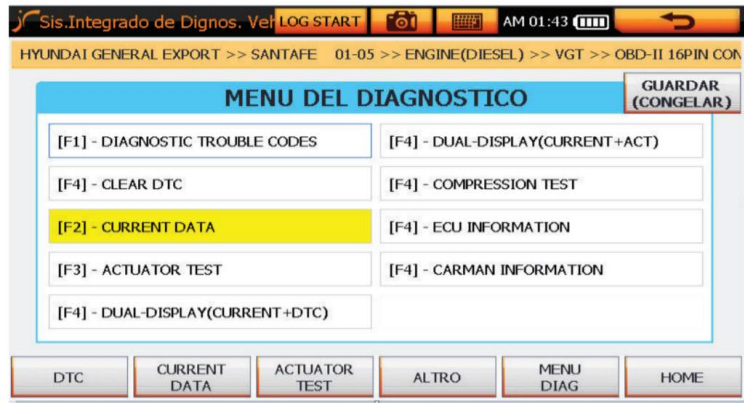
- Se despliega información; si el vehículo es a gasolina o diésel. Seleccionar la opción ENGINE (DIESEL).



- Escoger la opción VGT, correspondiente al sistema de sobrealimentación, en este caso (Turbo de Geometría Variable).



- Finalmente seleccionar el tipo de conector: OBDII 126 PIN CONECTOR, seguidamente aparece la pantalla del menú del diagnóstico del vehículo SANTA FE 01-05>>>VGT.
- Ingresar con “F2” – CURRENT DATA, para la lectura de los datos actuales del motor.



ANEXO 7: Valores de referencia y equivalencias para las pruebas del circuito de baja presión de combustible y compresión del motor [28].

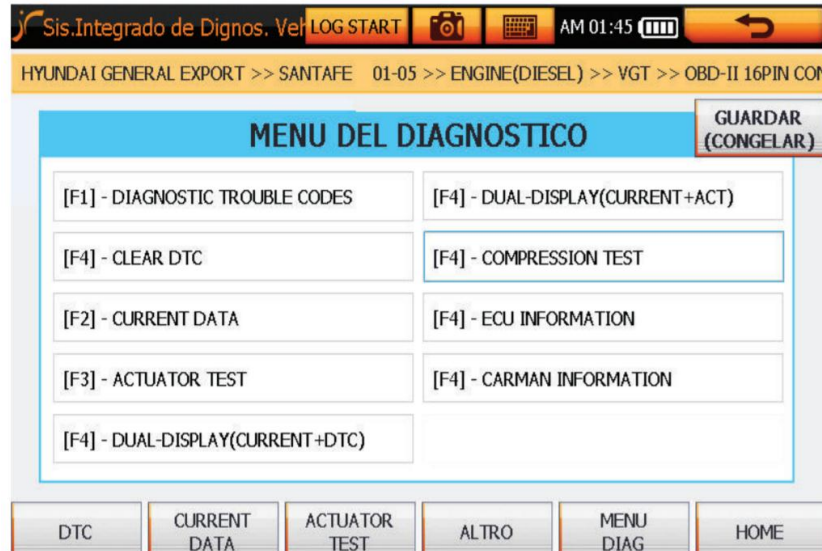
EQUIVALENCIAS DE UNIDADES DE PRESIÓN	
1bar	14,503 psi
1bar	100 kPa
1Pascal (Pa)	10 ⁻⁵ bar

PRUEBAS DEL CIRCUITO DE BAJA PRESION DE COMBUSTIBLE				
DESCRIPCION		VALORES DE REFERENCIA		
		bar	PSI	kPa
Presión normal de funcionamiento de la bomba eléctrica de combustible		1.5 – 3.5	21.75 – 50.75	150 - 350
Presión residual		2,895	42	289.5
Presión de retorno	<i>Motor encendido</i>	0.2 – 0.9	2.9 – 13.05	20 - 90
	<i>Motor apagado</i>	Max. 1.2	Max. 17.4	Max. 120

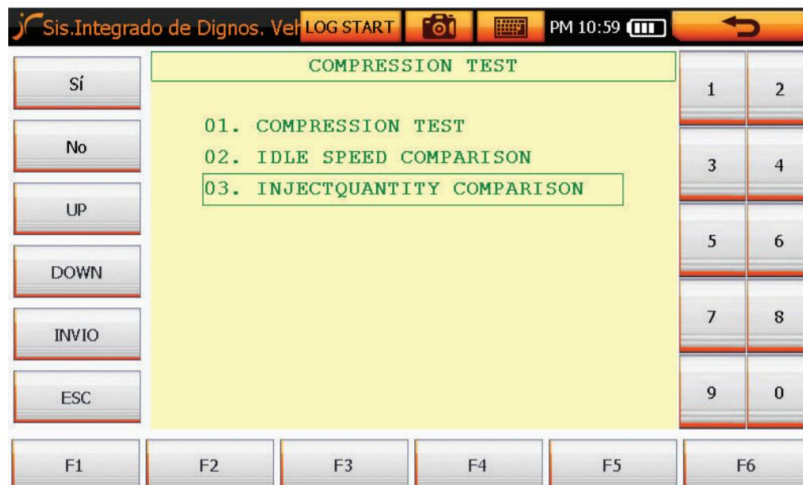
Presión de compresión por cilindro	Límite permisible entre cilindros	(%) Variación entre cilindros
29,42 bar (2942 kPa; 30 kg/cm ² ; 426 psi)	1bar (100 kPa, 1 kg/cm ² ; 14 psi)	3

ANEXO 8: Test para la comprobación de la cantidad de combustible inyectado a los cilindros del motor [27].

- En el menú del diagnóstico seleccionar: F4: COMPRESSION TEST.



- Escoger la opción 03: INJECTQUANTITY COMPARISON.



- Se obtiene a continuación, una tabla con diferentes revoluciones de los cilindros y la cantidad de inyección en mm³.

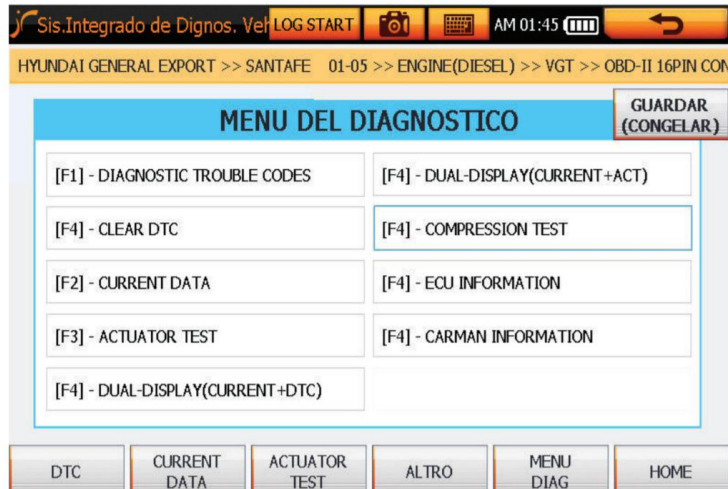
Sis.Integrado de Dignos. Veh LOG START AM 02:43										
Sí	INJECTQUANTITY COMPARISON								1	2
	ENGINE RPM				INJECTION QUANTITY (MM3)					
No	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	3	4
	832	834	834	834	-0.50	-0.62	0.36	0.37		
UP	832	834	832	832	-0.54	-0.58	0.39	0.35	5	6
DOWN	830	834	832	832	-0.51	-0.58	0.38	0.36		
INVIO	830	832	832	830	-0.55	-0.56	0.36	0.39	7	8
	832	832	830	830	-0.52	-0.52	0.33	0.38		
ESC	830	832	834	832	-0.47	-0.60	0.32	0.35	9	0
	830	832	832	832	-0.50	-0.53	0.30	0.33		
CHECK THE TEST RESULT										
ANAL	F2	F3	F4	F5	F6					

- Luego de efectuar el “Check the test result”, seleccionar en la barra inferior ANALIZAR.
- Aparecen los resultados finales en la pantalla. En la parte superior las revoluciones promedio de cada cilindro y en la parte inferior la cantidad promedio de combustible inyectado en cada cilindro.

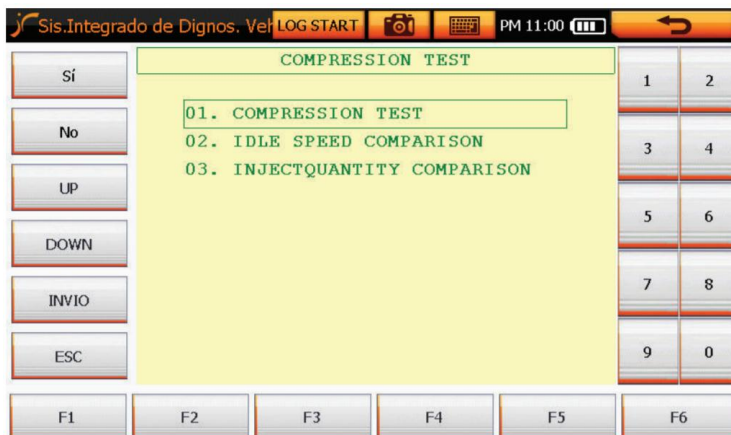
Sis.Integrado de Dignos. Veh LOG START AM 02:45									
Sí	ENGINE RPM PER EACH CYL.						1	2	
	SPEED (RPM)	650	750	850	950	AVG.			
No	NO.1 CYL.					830	3	4	
	NO.2 CYL.					832			
UP	NO.3 CYL.					832	5	6	
DOWN	NO.4 CYL.					831			
INVIO	QUANT. (MM3)	-4	-2	0	2	4	AVG.	7	8
	NO.1 CYL.						-0.47		
ESC	NO.2 CYL.						-0.56	9	0
	NO.3 CYL.						0.32		
F1	F2	F3	F4	PREV	HELP				

ANEXO 9: Test para la medición de compresión del motor [27].

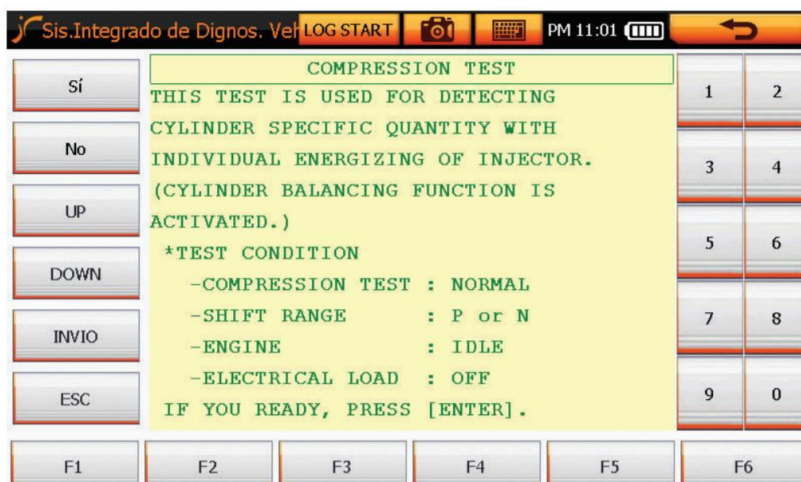
- En el menú de diagnóstico seleccionar F4 – Compresion TEST.



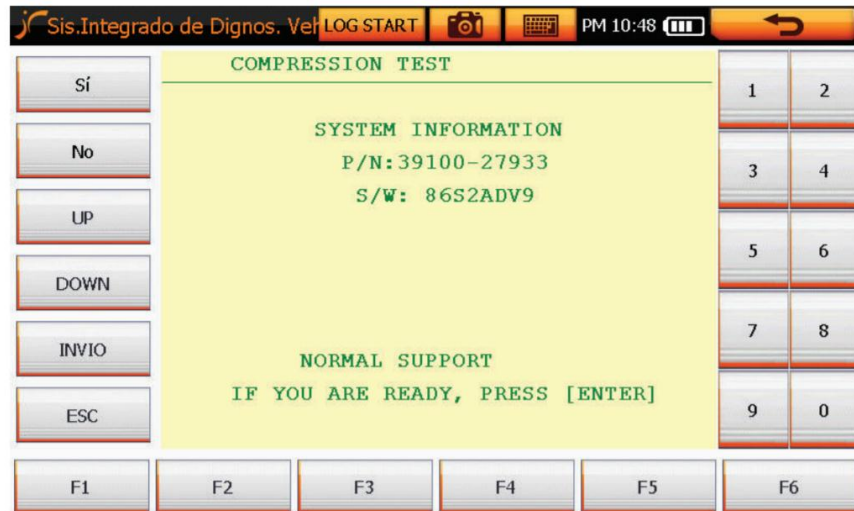
- Aparece el siguiente cuadro, con 3 opciones, escoger la numeror 01. COMPRESION TEST.



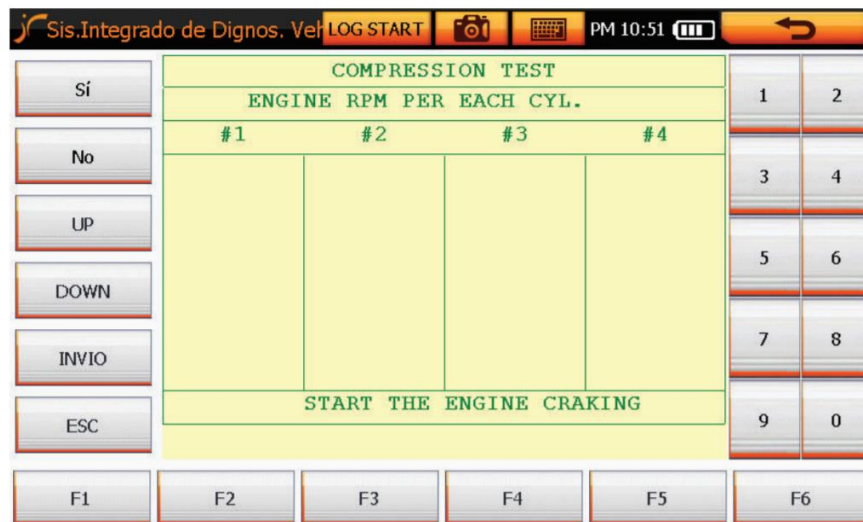
- Se muestra un cuadro de dialogo, con las condiciones para ejecutar el Test, una vez listo presionar “ENTER”.



- Seguidamente, aparece un cuadro con información del sistema de la COMPRESSION TEST. Luego presionar nuevamente “ENTER”.



- Aparece la pantalla de prueba: COMPRESSION TEST. Seguidamente dar arranque al motor “Start engine craking”, hasta que la pantalla indique un mensaje de “Stop” o parada.



- Los resultados de las revoluciones de cada motor por cada cilindro se visualizan durante el arranque.

Sis.Integrado de Dignos. Ver LOG START						AM 02:49
Sí	COMPRESSION TEST				1	2
	ENGINE RPM PER EACH CYL.					
No	#1	#2	#3	#4	3	4
UP	331	340	340	332		
DOWN	331	341	339	332	5	6
INVIO	332	339	339	332		
ESC	332	339	339	332	7	8
	332	340	338	333		
	329	339	340	333	9	0
	CHECK THE TEST RESULT					
ANAL	F2	F3	F4	F5	F6	

- Al presionar en la pantalla la tecla “ANALIZAR”, aparece un cuadro resumen con las revoluciones promedio de cada cilindro.
- El menor número de rpm, representa el cilindro con mayor compresión, debido a que mientras más compresión tenga el cilindro, mayor oposición representara al desplazamiento del pistón, y por ende genera un menor número de revoluciones o viceversa.

Sis.Integrado de Dignos. Ver LOG START						AM 02:49	
Sí	ENGINE RPM PER EACH CYL.					1	2
	SPEED (RPM)	200	250	300	350	AVG.	
No	NO. 1 CYL.					331	
UP	NO. 2 CYL.					338	3
DOWN	NO. 3 CYL.					338	4
INVIO	NO. 4 CYL.					332	5
ESC							6
							7
							8
							9
							0
F1	F2	F3	F4	PREV	HELP		