

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

SEDE LATACUNGA



CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“ANÁLISIS DE LOS GASES DE ESCAPE MEDIANTE LA
OPTIMIZACIÓN DEL MOTOR ISUZU DEL LABORATORIO DE
MOTORES DIESEL-GASOLINA”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**JORGE DAVID CAÑIZARES CALDERÓN
GUILLERMO MAURICIO CRUZ ARCOS**

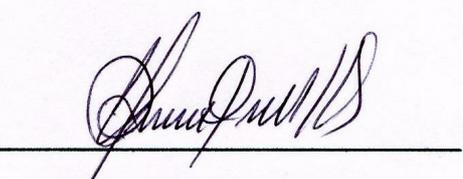
Latacunga, diciembre 2008

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge David Cañizares Calderón y Guillermo Mauricio Cruz Arcos, bajo nuestra supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Mena', written over a horizontal line.

ING. LUIS MENA
DIRECTOR DE PROYECTO

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Néstor Romero', written over a horizontal line.

ING. NÉSTOR ROMERO
CODIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Quiero dar las gracias en primer lugar a DIOS ya que gracias a él pude realizar una de las metas y anhelos de mi vida.

Quiero agradecer con todo mi corazón a mis padres Fausto y Yolanda, a mis hermanos Anita, Darío y María Belén quien desde el cielo me ha guiado y cuidado, así como a toda mi familia por su paciencia, su apoyo incondicional y su confianza, mostrada en los momentos más difíciles de mi vida.

Mi agradecimiento a la Carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPE-L por su valiosa colaboración, especialmente a mí Director y Codirector de tesis, Luis Mena y Néstor Romero, por la dedicación y el apoyo conferido durante todo este tiempo y sobre todo por la confianza mostrada en todo momento, sin la cual no hubiese logrado finalizar esta tesis.

No quisiera olvidar en esta lista de agradecimientos a todos mis amigos de la Carrera de Ingeniería Automotriz, especialmente a mi compañero de tesis Mauricio por su dedicación y buena voluntad mostrada en el desarrollo del proyecto, a mis demás amigos, ya que con ellos he compartido problemas y alegrías, y descubrí que la palabra amistad es más que una palabra.

En general doy las gracias a todos los que me han ayudado con sus ideas y sobre todo con su tiempo, en el desarrollo, revisión y depuración de esta tesis.

Jorge David Cañizares

DEDICATORIA

A mi familia por todo el apoyo que me brindaron durante mi estudio universitario, económico, comprensión y dedicación en los buenos y en los malos momentos, quienes me ayudaron a perseverar y enfrentar algunas de las pruebas más difíciles. En especial a mi madre Yolanda Calderón y a mi padre Fausto Cañizares que han entregado muchos de sus anhelos y sueños por cumplir los míos. Que Dios los guarde, les muestre la verdad y los conduzca por caminos de justicia siempre.

“Todo lo inteligente ya ha sido pensado, solo hay que intentar pensarlo una vez más”

Jorge David Cañizares

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios quien supo guiarme por el camino del bien y me permitió alcanzar una de las metas propuesta en mi vida.

A mis padres, mi hermano y todos mis familiares quienes confiaron siempre en mí y me supieron brindar su apoyo incondicional en todo momento, siendo un pilar importante para vencer las distintas adversidades que tuve en la vida universitaria

Gracias a mis maestros que supieron compartir sus conocimientos y forjaron en mi un espíritu de trabajo y responsabilidad

¡Muchas Gracias!

Mauricio Cruz

DEDICATORIA

El presente trabajo quiero dedicárselo a mis padres y a mi hermano, que con su esfuerzo, sacrificio, apoyo y confianza han sabido estar junto a mí en cada momento difícil e importante de mi vida, ayudándome a alcanzar cada una de mis metas

A mis tíos, primos y amigos que con su confianza y comprensión me alentaron para cumplir una etapa más de mi vida

A Dios por haberme guiado en un sendero de honradez y perseverancia

Mauricio Cruz

ÍNDICE

CARÁTULA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxi
INTRODUCCIÓN.....	xxiii

I. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LOS PARÁMETROS INDICADOS Y EFECTIVOS DEL MOTOR DIESEL

Introducción.....	1
Calidad de la formación de la mezcla y tipos de cámara de combustión.....	2
Tipos y clasificación de las cámaras de combustión.....	5
Con cámara de inyección directa.....	6
Con cámara arremolinadora.....	7
Con cámara de combustión con depósito de aire.....	8
Con antecámara de combustión.....	9
Comparación entre las diversas cámaras.....	10
Proceso de combustión en el motor diesel.....	12
1.2.3.1. Combustión homogénea.....	12
1.2.3.2. Combustión normal y combustión anormal.....	13
Relación de compresión.....	14
Angulo de avance a la inyección.....	14
Retraso a la inflamación.....	15
Fases del proceso de combustión.....	15
1.4.2.1. Retraso al encendido.....	15
1.4.2.2. Fase de combustión de premezclado.....	16

1.4.2.3.	Fase de combustión controlada de la mezcla.....	16
1.4.2.4.	Fase posterior a la combustión.....	16
	Variación de la temperatura en la pared del interior del cilindro.....	17
	Frecuencia de rotación.....	18
	Influencia de la velocidad de movimiento de la mezcla de trabajo.....	18
Turbulencia.....		18
	Propagación del frente de llama.....	19
	Flujo a través del conjunto ducto–válvula de admisión.....	21
	Flujo a través de la válvula de admisión	22
	Flujo en el cilindro.....	22
1.6.5.1.	Tumble.....	23
1.6.5.2.	Swirl.....	24
	Influencia del huelgo entre la cabeza del pistón y la culata.....	24
	Propiedades del combustible.....	25
	Requisitos.....	25
	Composición del combustible.....	25
1.8.2.1.	Número e índice de cetano.....	25
1.8.2.2.	Densidad y viscosidad.....	26
1.8.2.3.	Azufre.....	26
1.8.2.4.	Aromáticos.....	27
	Relación entre las propiedades físicas y el rendimiento del combustible.....	27
1.8.3.1.	Viscosidad.....	27
1.8.3.2.	Punto de escurrimiento, enturbiamiento.....	28
1.8.3.3.	Estabilidad.....	28
1.8.3.4.	Peso específico.....	28
1.8.3.5.	Punto de inflamación.....	28
1.8.3.6.	Impurezas.....	28
	Variación de los parámetros efectivos del motor en función de las condiciones del medio ambiente.....	28
	Comportamiento termodinámico del aire.....	30

II. TOXICIDAD DE LOS GASES DE ESCAPE

Análisis del proceso de escape en los motores diesel.....	34
Emisiones de los motores diesel	36
Composición de los productos de combustión.....	38
Ingreso del combustible a la cámara de combustión.....	39
Análisis de la composición de los productos de combustión.....	40
Calidad del combustible.....	41
Coeficiente de los gases residuales.....	41
Contaminación por los motores de combustión interna diesel.....	43
Composición de los gases de escape.....	45
Los óxidos de nitrógeno (NO _x).....	48
Dióxido de azufre (SO ₂).....	50
Dióxido de carbono (CO ₂).....	50
Material particulado del diesel (MPD).....	51
Hidrocarburos no quemados.....	52
Toxicidad de los componentes de los gases de escape de motores diesel...53	
Influencia del cetano sobre las emisiones de descarga.....	55
Contribución del azufre del combustible sobre el material particulado.....	56
Métodos para neutralizar los gases de escape.....	56
Convertidores catalíticos.....	57
Filtro de partículas.....	59
Sistema CRT.....	60
Sistema CCRT.....	61

III. SOBREALIMENTACIÓN POR TURBOCOMPRESOR Y ENFRIAMIENTO DEL AIRE DE ADMISIÓN MEDIANTE INTERCOOLER EN EL MOTOR ISUZU 4BD1T

El turbocompresor.....	62
Ciclos de funcionamiento del turbocompresor.....	63
Constitución de un turbocompresor.....	63
Regulación de la presión en el turbocompresor.....	65
Temperatura de funcionamiento.....	66
Recomendaciones de mantenimiento y cuidado para los turbocompresores	68
Clasificación de los turbocompresores.....	69
Comparación de los turbocompresores centrífugos y los axiales.....	70
Rendimiento de los turbocompresores.....	71
Incremento de presión.....	72
3.3.2.1. Turbocompresor axial.....	72
3.3.2.2. Turbocompresor radial.....	73
Campo de aplicación.....	74
Diagrama de velocidad de la turbina.....	75
Engrase del turbocompresor.....	77
Materiales de construcción.....	79
Intercooler o postenfriador del aire de admisión.....	81
Mecanismos básicos de transmisión de calor.....	81
Conducción.....	81
Convección.....	81
Convección natural.....	82
Convección forzada.....	82
Radiación.....	82
Estructura del intercambiador de calor de flujos cruzados.....	83
Clasificación de los intercambiadores de calor.....	87
Turbocargados postenfriadores aire-agua.....	87
Turbocargados postenfriadores aire-aire.....	87
Selección del intercooler para el motor Isuzu. Parámetros principales.....	90

IV. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE EN EL MOTOR ISUZU

Recirculación de gases.....	96
Clasificación de los sistemas de EGR.....	97
Clasificación basada en la temperatura.....	97
4.2.1.1. Recirculación de los gases de escape calientes.....	97
4.2.1.2. Recirculación de gases de escape enfriados completamente.....	97
4.2.1.3. Recirculación de gases de escape enfriados parcialmente.....	97
Clasificación basada en la configuración.....	98
4.2.2.1. Sistema de largo recorrido (LR).....	98
4.2.2.2. Sistema de corto recorrido (CR).....	98
Clasificación basada en la presión.....	99
4.2.3.1. Sistema de recorrido de baja presión.....	99
4.2.3.2. Sistema de recorrido de alta presión.....	99
Recirculación de gases de escape, técnica para la reducción del NO _x	100
Componentes del sistema de recirculación de gases.....	102
Sensores de rotación del cigüeñal (CKP).....	103
Sensores de temperatura.....	104
4.4.2.1. Sensor de temperatura del agua (WTS).....	104
4.4.2.2. Sensor de temperatura del aire (IAT).....	105
Sensor de flujo másico de aire (MAF).....	105
Válvula EGR.....	106
4.4.4.1. Tipos de válvulas EGR.....	107
4.4.4.2. Circuito EGR.....	108
4.4.4.3. Condiciones de funcionamiento de la EGR.....	109
Unidad de control electrónica (ECU).....	109
Diseño del sistema de recirculación de gases para el motor Isuzu 4BD1T.....	110
Implementación de los sensores en el motor Isuzu.....	110
Sensor de temperatura del agua (WTS).....	110

Sensor de revoluciones (CKP).....	112
Sensor de flujo másico de aire (MAF) y temperatura de aire (IAT).....	113
Sensor de oxígeno (EGO).....	115
Motor paso a paso.....	116
4.6.5.1. Tipos de motores paso a paso.....	119
4.6.5.2. Selección del motor paso a paso.....	120
Válvula Bypass.....	122
Diseño del programa y módulo de control del sistema de recirculación de gases de escape.....	123
Características del sistema.....	124
Parámetros y señales consideradas para el diseño.....	125
4.8.2.1. Ingreso de señales y su procesamiento.....	125
4.8.2.2. Señales de operación.....	126
Selección del microcontrolador.....	126
Selección del PIC 16F877.....	126
Características.....	127
Selección de elementos eléctricos y electrónicos.....	128
Regulador de voltaje.....	128
Diseño del diagrama electrónico.....	130
Selección de componentes.....	131
Descripción de operación y características de componentes del módulo de control.....	132
2	
PIC 16F877.....	132
Motor paso a paso.....	133
Análisis económico.....	133
Instalación y pruebas de operación en el proto-board.....	135
Programación y quemado del PIC.....	135
Armado y pruebas del circuito en el proto-board.....	136
Diseño y construcción de placas.....	138

**V. INSTALACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE
RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE EN EL MOTOR
ISUZU 4BD1T**

Montaje e instalación.....	141
Instalación del módulo en la caja metálica.....	141
Cableado de los sensores y del motor paso a paso.....	143
Pruebas del módulo.....	147
Utilización del módulo.....	150
Encendido del módulo.....	151
Protección del módulo.....	151
Modo calibración.....	152
Valores fuera de rango.....	156
Modo activación.....	156
Modo desactivación.....	158
Leds indicadores.....	159
Conclusiones.....	161
Recomendaciones.....	163
Bibliografía.....	164

ANEXOS

Anexo "A" Programa del PIC.....	165
Anexo "B" Diseño del sistema de recirculación.....	195

ÍNDICE DE FIGURAS

I CAPÍTULO

Figura 1.1 Cámara de inyección directa.....	7
Figura 1.2 Inyección directa sin turbulencia sistema Sauver e inyección directa con turbulencia sistema Mazz.....	8
Figura 1.3 Cámara de combustión con depósito de aire.....	9
Figura 1.4 Cámara con precombustión sistema Mercedes Benz.....	10
Figura 1.5 Diagrama de razón de calor liberado para motores de encendido por compresión.....	17
Figura 1.6 Variación de la temperatura en la pared de la cámara con y sin recubrimiento cerámico.....	18
Figura 1.7 Comportamiento de la turbulencia.....	19
Figura 1.8 Flujo a través de la válvula de admisión.....	22
Figura 1.9 Tumble.....	23
Figura 1.10 Swirl.....	24
Figura 1.11 Viscosidad de combustibles.....	27
Figura 1.12 Efecto de la altitud sobre la presión atmosférica.....	31
Figura 1.13 Efecto de la altitud sobre la fracción molar de oxígeno.....	32
Figura 1.14 Efecto de la altitud sobre la concentración de oxígeno.....	33

II CAPÍTULO

Figura 2.1	Tiempo de explosión del motor diesel.....	35
Figura 2.2	Zonas del spray.....	40
Figura 2.3	Velocidad de llama, química y transporte.....	44
Figura 2.4	Contaminantes del ciclo diesel versus riqueza.....	44
Figura 2.5	Composición de los gases de escape.....	47
Figura 2.6	Partícula de hollín.....	48
Figura 2.7	Tamaño de las partículas de las emisiones de gases.....	52
Figura 2.8	Efectos del cetano sobre las emisiones de NO _x	55
Figura 2.9	Efecto del azufre en el combustible diesel sobre emisiones de MP.....	56
Figura 2.10	El convertidor catalítico trimodal.....	59
Figura 2.11	Flujo a través de las paredes del filtro.....	60
Figura 2.12	Principio de funcionamiento CRT.....	61
Figura 2.13	Principio de funcionamiento para el sistema CCRT.....	61

III CAPÍTULO

Figura 3.1 Turbocompresor.....	62
Figura 3.2 Elementos del turbocompresor.....	64
Figura 3.3 Válvula waste gate.....	64
Figura 3.4 Activación de la válvula waste gate.....	65
Figura 3.5 Temperaturas de funcionamiento del turbocompresor.....	67
Figura 3.6 Esquema de refrigeración.....	68
Figura 3.7 Corte de un turbocompresor: a) radial; b) diagonal; c) axial.....	69
Figura 3.8 Curvas típicas de rendimiento a cargas parciales.....	71
Figura 3.9 Curvas características de un turbocompresor: a) radial, b) axial.....	72
Figura 3.10 Diagrama de velocidades.....	76
Figura 3.11 Circuito de engrase.....	78
Figura 3.12 Estructura del intercambiador de calor.....	84
Figura 3.13 Pantallas utilizadas en los intercambiadores de calor de carcasa y tubos.....	84
Figura 3.14 Distribución de temperaturas en intercambiadores.....	86
Figura 3.15 Distribución de temperaturas en intercambiadores de calor con flujos en contra corriente y de un solo paso de tubos.....	86
Figura 3.16 Intercambiador de calor aire-aire.....	88
Figura 3.17 Temperatura de ingreso al turbocompresor y salida al enfriador.....	93
Figura 3.18 Temperatura de ingreso al turbocompresor y salida al enfriador al alcanzar la temperatura ideal de trabajo de 82 °C el motor Isuzu.....	93
Figura 3.19 Enfriador del aire de admisión antes de la selección.....	95

IV CAPÍTULO

Figura 4.1 Reducción de la emisiones de NO _x debido a la EGR en diferentes cargas.....	101
Figura 4.2 Componentes del sistema de recirculación de gases.....	103
Figura 4.3 Sensor de posición del cigüeñal (CKP).....	103
Figura 4.4 Sensores WTS.....	105
Figura 4.5 Sensores IAT.....	105
Figura 4.6 Configuración interna del sensor MAF.....	106
Figura 4.7 Válvula EGR.....	107
Figura 4.8 Válvula EGR neumática.....	107
Figura 4.9 Válvula EGR eléctrica.....	108
Figura 4.10 Circuito EGR.....	108
Figura 4.11 ECU.....	110
Figura 4.12 Circuito del sensor WTS.....	111
Figura 4.13 Localización del sensor WTS en el motor Isuzu.....	111
Figura 4.14 Conector del sensor.....	111
Figura 4.15 Señal de salida del sensor inductivo.....	112
Figura 4.16 Diagrama eléctrico el sensor CXP.....	112
Figura 4.17 Localización del sensor CKP en el motor Isuzu.....	113
Figura 4.18 Conector del sensor CKP.....	113
Figura 4.19 Esquema de conexión del sensor MAF de 5 pines.....	114
Figura 4.20 Localización del sensor MAF en el motor Isuzu.....	114
Figura 4.21 Conector del sensor MAF.....	115
Figura 4.22 Localización del sensor de oxígeno.....	116
Figura 4.23 Fluctuaciones del sensor de oxígeno.....	117
Figura 4.24 Esquema eléctrico del sensor de oxígeno.....	117
Figura 4.25 Conector del sensor de oxígeno.....	117
Figura 4.26 Motor paso a paso unipolar.....	121
Figura 4.27 Instalación del motor a pasos en el motor Isuzu.....	122
Figura 4.28 Localización de la válvula bypass.....	123
Figura 4.29 Sistema de activación de la válvula bypass.....	123

Figura 4.30	Proceso de ingreso de señales.....	125
Figura 4.31	PIC 16F8777A.....	128
Figura 4.32	Circuito de regulación de voltaje.....	129
Figura 4.33	Circuito eléctrico de aplicación.....	130
Figura 4.34	PIC 16F877A.....	132
Figura 4.35	Motor a pasos.....	133
Figura 4.36	Programa del PIC.....	136
Figura 4.37	Quemador universal el PIC.....	136
Figura 4.38	Armado del circuito de prueba en el proto-board.....	137
Figura 4.39	Pruebas en el proto-board.....	137
Figura 4.40	Placa de acoplamiento de señales.....	138
Figura 4.41	Placa de fuente de voltaje y potencia motor a pasos.....	139
Figura 4.42	Placa de control de PIC.....	139
Figura 4.43	Inmersión de las placas.....	140
Figura 4.44	Soldado de las placas.....	140

V CAPÍTULO

Figura 5.1 Caja metálica para la instalación del módulo.....	141
Figura 5.2 Ubicación de las placas en el soporte.....	142
Figura 5.3 Montaje de las placas en la caja metálica.....	142
Figura 5.4 Tapa de la caja metálica.....	143
Figura 5.5 Cableado de los sensores y del motor a pasos.....	144
Figura 5.6 Borneras: a) sensores, b) motor a pasos.....	144
Figura 5.7 Pines del motor a pasos.....	145
Figura 5.8 Sensores y motor a pasos conectados a las borneras.....	145
Figura 5.9 Conexiones de los sensores y del motor a pasos.....	146
Figura 5.10 Conexión para la bate.....	146
Figura 5.11 Conexiones del motor a pasos.....	147
Figura 5.12 Instalación del módulo.....	148
Figura 5.13 Calibración de los sensores.....	148
Figura 5.14 Funcionamiento de prueba del módulo.....	149
Figura 5.15 Instalación definitiva del módulo.....	149
Figura 5.16 Control de funcionamiento del módulo.....	150
Figura 5.17 Menú principal.....	150
Figura 5.18 Interruptor de encendido (posición ON).....	151
Figura 5.19 Interruptor de encendido (posición OFF)	151
Figura 5.20 Protección del módulo.....	152
Figura 5.21 Pantalla de control de calibración.....	153
Figura 5.22 Pantalla de calibración.....	153
Figura 5.23 Calibración temperatura aire	153
Figura 5.24 Valores máxima y mínima de calibración del sensor de aire.....	154
Figura 5.25 Calibración del número de pasos.....	154
Figura 5.26 Calibración temperatura agua.....	155
Figura 5.27 Calibración de número de revoluciones.....	155
Figura 5.28 Calibración del motor a pasos.....	156
Figura 5.29 Pantalla de error de ingreso de datos.....	156
Figura 5.30 Pantalla de control de activación.....	157
Figura 5.31 Modo de monitoreo.....	157

Figura 5.32 Pantalla de monitoreo de temperaturas.....	157
Figura 5.33 Pantalla de sistema inactivo.....	159
Figura 5.34 Módulo desactivado.....	159
Figura 5.35 Leds indicadores.....	160

ÍNDICE DE TABLAS

I CAPÍTULO

Tabla I.1 Ventajas y desventajas de la inyección directa y la inyección indirecta.....	11
--	----

II CAPÍTULO

Tabla II.1 Componentes emitidos por los motores diesel y sus transformaciones en la atmósfera.....	37
Tabla II.2 Calidad del combustible.....	41
Tabla II.3 Componentes principales de los gases de escape	46
Tabla II.4 Rangos de materiales tóxicos.....	48
Tabla II.5 Estimación promedio de la toxicidad (g/CV) (g/KWh) de motores diesel con cámaras separadas y con inyección directa del combustible.....	54

III CAPÍTULO

Tabla III.1 Rendimientos en los turbocompresores.....	74
Tabla III.2 Propiedades mecánicas principales de los materiales empleados para fabricar las piezas de los turbocompresores.....	80
Tabla III.3 Análisis de los sistemas de intercambiadores de calor.....	88
Tabla III.4 Comparación entre los motores de referencia y motor de pruebas.....	91
Tabla III.5 Valores medios estadísticos de la frecuencia nominal de rotación (rpm) de los motores diesel en relación con el diámetro el cilindro (D). Motores de producción Americana y Europea.....	92

IV CAPÍTULO

Tabla IV.1	Valores de funcionamiento de un sensor WTS.....	111
Tabla IV.2	Terminales del sensor WTS.....	112
Tabla IV.3	Terminales del sensor CKP.....	113
Tabla IV.4	Terminales del sensor MAF.....	115
Tabla IV.5	Terminales del sensor de oxígeno.....	118
Tabla IV.6	Señales del sensor de oxígeno.....	118
Tabla IV.7	Secuencia de excitación de bobinas para el funcionamiento de un motor unipolar en modo completo.....	121
Tabla IV.8	Valores de entrada al PIC.....	126
Tabla IV.9	Características del PIC 16F877	127
Tabla IV.10	Elementos utilizados en el módulo de control.....	131
Tabla IV.11	Componentes y costos de la placa de acoplamiento de señales.....	133
Tabla IV.12	Componentes y costos de la placa de voltaje y control motor a pasos.....	134
Tabla IV.13	Componentes y costos de la placa de control del PIC.....	134

V CAPÍTULO

Tabla V.1	Rangos de calibración para los sensores.....	155
-----------	--	-----

INTRODUCCIÓN

Los rápidos y sustanciales avances tecnológicos en los automóviles a diesel han producido un gran impacto en la industria lo que se traduce especialmente en la necesidad de ampliar los conocimientos del Ingeniero Automotriz a fin de garantizar a la industria automotriz tecnología de punta.

La utilización de la sobrealimentación, se fundamenta en la mejora de la combustión del motor debido a un mayor llenado de aire en los cilindros, lo que provoca un aumento de potencia y un menor consumo específico, permitiendo que los vehículos tengan un mejor rendimiento.

Además de poseer un control adecuado gracias a la gran variedad de sensores y actuadores, lo que nos permite reducir costos y lo más importante que no produzca gases de contaminación.

El primer capítulo presenta la información básica acerca de los factores que influyen sobre los parámetros indicados y efectivos del motor diesel, y el rendimiento del combustible.

El segundo capítulo análisis del proceso de escape en los motores diesel, la composición de los productos de combustión, toxicidad de los componentes de los gases de escape y los métodos para neutralizarlos.

El tercer capítulo explica la sobrealimentación por turbocompresor y enfriamiento del aire de admisión mediante intercooler.

El cuarto capítulo expone el funcionamiento de los distintos sensores instalados en el motor, además muestra el diseño del programa y del módulo de control para el sistema de recirculación de gases de escape.

El quinto capítulo muestra la instalación y pruebas de funcionamiento del sistema de recirculación de gases de escape en el motor Isuzu 4BD1T.

“ANÁLISIS DE LOS GASES DE ESCAPE MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DEL MOTOR ISUZU DEL LABORATORIO DE MOTORES DIESEL-GASOLINA”

J. David Cañizares C. AUTOR¹

G. Mauricio Cruz A. AUTOR²

Ing. Luis Mena N. AUTOR³

Ing. Néstor Romero. AUTOR⁴

¹Dept. of Mechanique Automotive Eng. Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga, Quijano y Ordóñez y Márquez de Maenza S/N Latacunga, Ecuador,

email: daviflo8@yahoo.com.es

²Dept. of Mechanique Automotive Eng. Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga, Quijano y Ordóñez y Márquez de Maenza S/N Latacunga, Ecuador,

email: cruz-mauricio@hotmail.com

³Dept. of Mechanique Automotive Eng. Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga, Quijano y Ordóñez y Márquez de Maenza S/N Latacunga, Ecuador,

email :lamena@espe.edu.ec

⁴Dept. of Mechanique Automotive Eng. Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga, Quijano y Ordóñez y Márquez de Maenza S/N Latacunga, Ecuador,

email: nromeroespe.edu@hotmail.com

Resumen – Con el diseño e implementación de un módulo para el análisis de los gases de escape mediante la optimización del motor Isuzu se logrará disminuir la formación de óxidos de nitrógeno ya que se disminuye la temperatura de combustión en determinadas fases del funcionamiento del motor (a baja y media carga). Esto se consigue mediante el sistema EGR, que introduce en los cilindros ciertas cantidades de gases de escape que ya han sido previamente quemados y que prácticamente no contienen oxígeno, por lo que apenas arderán.

I. INTRODUCCIÓN

Los rápidos y sustanciales avances tecnológicos en los automóviles a diesel han producido un gran impacto en la industria lo que se traduce especialmente en la necesidad de ampliar los conocimientos del Ingeniero Automotriz a fin de garantizar a la industria automotriz tecnología de punta.

La utilización de la sobrealimentación, se fundamenta en la mejora de la combustión del motor debido a un mayor llenado de aire en los cilindros, lo que provoca un aumento de potencia y un menor consumo específico, permitiendo que los vehículos tengan un mejor rendimiento.

Para bajar la temperatura del aire de admisión además se ha colocado un sistema de intercambiador de calor, lo que nos permite tener un rendimiento más óptimo de nuestro sistema.

Además de poseer un control adecuado gracias a la gran variedad de sensores, lo que nos permite reducir costos y lo más importante que no produzca gases de contaminación.

II. DISEÑO DEL SISTEMA

El diseño este proyecto esta basado en la implementación de los distintos sistemas de control para la recirculación de gases de escape, tomando en cuenta todos los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento.

El objetivo del proyecto es diseñar y construir e instalar un módulo de control para la recirculación de los gases de escape del motor Isuzu 4BD1T.

A. Diseño electrónico

Para el diseño electrónico del módulo de control, se ha tomado en cuenta las distintas señales que este módulo va a controlar.

Por lo que se construyo un módulo que se encarga de captar e interpretar las distintas señales que recibe de los sensores así como también enviar las distintas señales para la activación del sistema de recirculación de gases.

Para empezar analizamos las señales de entrada y salida que va a tener el módulo, las señales de entrada son aquellas que nos enviarán los distintos sensores instalados en el motor Isuzu hacia nuestro controlador (PIC), mientras las señales de salida son las que salen del controlador directamente hacia el motor a pasos el cual se encargara de activar nuestra válvula de recirculación de gases de escape.

En seguida estudiamos los circuitos y elementos necesarios para poder realizar las distintas placas para nuestro módulo de control. Los circuitos son armados una vez que se tenga todos los componentes electrónicos y eléctricos seleccionados y debidamente probados.

Los elementos utilizados para este módulo fueron un microcontrolador 16F877A, regulador de voltaje 78L05, resistencias, diodos, condensadores, osciladores, leds; los circuitos y elementos se instalaron y probaron en Proto-Board.

La simulación de los sensores en el proto-board se la realiza con la ayuda de potenciómetros para variar el valor de su funcionamiento

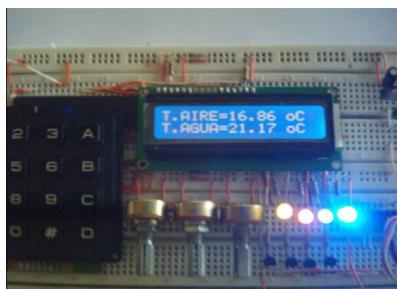


Fig.1 Pruebas de elementos y circuitos

Una vez probado el funcionamiento del circuito, podemos proceder a diseñar las placas electrónicas, en donde se ubicaran cada uno de los componentes electrónicos seleccionados, los cuales son nuevamente

probados para su posterior instalación en el vehículo.

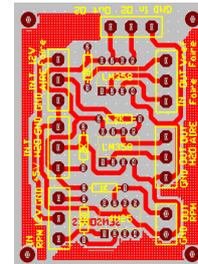


Fig.2 Placa de acoplamiento de señales

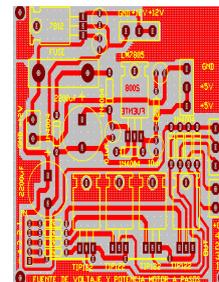


Fig.3 Placa de de fuente de voltaje y potencia motor a pasos

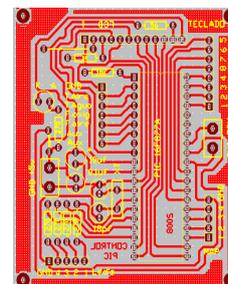


Fig.4 Placa de control de PIC

B. Diseño del sistema de recirculación

Implementación de lo sensores en el motor Isuzu

El WTS se encuentra en contacto directo con el refrigerante, para poder tomar con la máxima precisión la temperatura del medio.



Fig.5 Localización del sensor WTS

El MAF va fijado a la caja del filtro de aire, por poseer 5 pines tiene en su interior el sensor IAT; este sensor nos captará la

temperatura y el flujo de aire que necesita el módulo.



Fig.6 Localización del Sensor MAF

El sensor CKP es el que muestra información al módulo de control sobre las r.p.m., El sensor opera a través de la variación de campo magnético generado por el paso de los dientes de una polea dentada del cigüeñal.



Fig.7 Localización del sensor CKP

El Sensor de Oxígeno (EGO) se encuentra localizado en el múltiple de escape antes. Es un dispositivo capaz de medir la relación Lambda de los gases de escape en función de la cantidad de oxígeno que posean. La medida de la sonda Lambda es una señal de voltaje de entre 0 y 1 v.



Fig.8 Localización del Sensor de Oxígeno

El motor paso a paso en el sistema de recirculación de gases implementado en el motor Isuzu realizará el trabajo de la válvula EGR instalada en los vehículos modernos ya que este motor nos proporciona movimientos muy precisos para girar la válvula bypass.



Fig.9 Sistema de activación de la Válvula Bypass

C. Instalación del módulo

Al terminar todo el proceso de diseño y armado de las placas electrónicas, verificamos el espacio que vamos a utilizar para la ubicación de todos los componentes del módulo dentro de la caja metálica, de tal manera que nos permita tener una mayor accesibilidad y facilidad para realizar la instalaciones del cableado y del control de su funcionamiento.

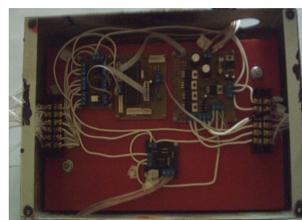


Fig.5 Montaje de las placas en la caja metálica

Hay que tener mucho cuidado, ya que cada uno de los pines de los sensores identificados anteriormente deben ir conectados correctamente para evitar que la recepción de señales que envían los sensores sean incorrectas o erróneas.



Fig.10 Sensores y motor a pasos conectados a las borneras

Para el ingreso de las señales al módulo se utilizara un teclado por medio del cual se calibran los datos para la activación de la válvula. Estas señales serán comparadas para verificar si se encuentran dentro de los rangos de activación, para luego ser procesadas por el PIC, el mismo que enviará la señal para la activación del motor a pasos.

El PIC procesará los datos que captan los diferentes sensores instalados en el motor, para luego ser desplegados en la pantalla Lcd.

Para empezar con su funcionamiento debemos energizar el módulo con una

batería de 12V, para después mediante el interruptor de encendido activar el módulo y realizar todas las pruebas respectivas.



Fig. 11 Funcionamiento de prueba del módulo

D. Utilización del módulo

El manejo de este módulo de control es sumamente muy sencillo, ya que en la pantalla Lcd nos presenta instrucciones que nos ayudan para su utilización.

El módulo de control nos presenta un menú principal el cual se subdivide en dos partes, una es la parte de calibración ya sea de los sensores como del motor a pasos; y la otra parte es la de activación en la que nos permite observar como varían los valores que captan los distintos sensores.



Fig.12 Menú principal

Una vez terminada la calibración de los sensores y del motor a pasos. Podemos proceder con la activación del sistema presionando la opción **2** tal como se nos indica en la pantalla principal.



Fig.13 Pantalla de control de activación

Después de haber activado el sistema de control del módulo. Podemos presionamos la tecla **A** para monitorear y observar el funcionamiento de los distintos sensores y de la variación que existen en los valores que estos están captando.

Para poder saber el momento en el que un sensor se encuentra dentro del rango de calibración, se han colocado leds indicadores, entonces estos se encenderán

cuando un sensor entre en el rango de activación.



Fig.14 Leds indicadores

Para que el sistema funcione totalmente y el motor a pasos empiece a girar y abra la válvula bypass, necesita recibir las tres señales de activación que son la temperatura de aire, la temperatura de agua y el número de revoluciones. Al momento de recibir estas tres señales el sistema activará automáticamente el motor a pasos haciendo girar la válvula bypass para permitir el paso de los gases de escape hacia el múltiple de admisión.

IV. RESULTADOS

Una vez terminado el proyecto se observó que el módulo de control para la recirculación de gases de escape es mucha utilidad ya que nos permite mejor los NOx de los gases de escape del motor Isuzu.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El diseño de los intercambiadores es un área donde tiene diversas aplicaciones los principios de transferencia de calor. El diseño real de un intercambiador de calor es un problema mucho más complicado que el análisis y la transferencia de calor porque en la selección del diseño final juegan un papel muy importante los costos, el peso, el tamaño y la condiciones de acoplamiento
- El uso de un turbocompresor es muy beneficioso para el rendimiento de un motor diesel debido a que el consumo específico de combustible baja con facilidad entre un 15 – 20% debido a que ingresa en los cilindros mayor cantidad de aire.
- El turbocompresor es un elemento mecánico de alta presión, dados los ajustes y las tolerancias muy precisas requeridas para

su operación, su diagnóstico y reparación debe realizarse por personas que posean conocimiento básico para su mantenimiento y reparación.

- La formación de óxidos de nitrógeno se reduce bajando la temperatura de combustión en determinadas fases de funcionamiento del motor (baja y media carga). Esto se consigue mediante el sistema de EGR que introduce en los cilindros cierta cantidad de gases de escape que ya ha sido previamente quemado y que prácticamente no contiene oxígeno por lo que apenas arderá.
- El diesel estándar es el que tiene peor comportamiento respecto a las emisiones de humos y partículas, la causa de estos resultados es el efecto conjunto el alto contenido de hidrocarburo aromáticos, densidad y viscosidad elevada, así como menor volatilidad y número de cetano
- No se debe realizar la introducción de los gases de escape a altas revoluciones ya que precisamente lo que necesita la mezcla es mayor densidad (aire frío) para lograr un mayor rendimiento del ciclo termodinámico del motor.
- El material de la base de la válvula debe ser de hierro fundido ya que tiene que soportar la temperatura de los gases de escape y el deterioro por la acción de los componentes químicos de estos gases
- Este módulo de control está diseñado para un amplio rango de puntos de funcionamiento del motor y grados de apertura de la válvula, lo cual nos permitirá comprender el funcionamiento de un sistema de recirculación de gases de escape.
- El diseño del sistema de recirculación de gases instalado en el motor no impide su normal funcionamiento ya que este no interfiere directamente en ningún sistema.
- La rapidez y calidad del sistema de control depende de los componentes que utilice (sensores) debido a que hay muchos en el mercado con distinta tecnología, lo que podría variar en los resultados obtenidos.
- El módulo de control del sistema nos permite mantener una interacción entre el controlador del sistema y el motor, e inclusive despliega las condiciones de

funcionamiento el motor a las que está operando.

- Al momento de realizar las pruebas de operación en el módulo concluimos que la válvula bypass instalada en el motor no se activara si las tres condiciones de funcionamiento no son las adecuadas.
- Para realizar la comprobación del estado y proceder a la limpieza de la válvula es necesario desmontar el sistema, verificando que la mariposa y el eje de la válvula no se encuentren cubiertos de carbón o aceite ya que en el caso de estar deteriorada anula la funcionalidad del sistema.
- Diseñar correctamente cada una de las placas electrónicas, evitando que exista cruce en las líneas de conexión, y verificando que se encuentren en buen estado.
- Realizar las conexiones de los sensores con mucho cuidado para evitar que los pines de estos sufran daños.
- Revisar las conexiones del motor a pasos para su correcto funcionamiento.
- Revisar que la protección del módulo de control (fusible) se encuentren en buen estado, así como también conectar adecuadamente la alimentación del sistema.
- Antes de encender el módulo de control verificar que su fuente de alimentación de 12V se encuentre correctamente conectada.
- Operar con mucho cuidado el módulo de control para evitar que los elementos electrónicos sufran algún daño ya que estos son sensibles a golpes.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- BOSCH.- Electrónica aplicada al motor.
- CORRALES SANTIAGO, Electrónica práctica con microcontroladores PIC, Ed. Imprenta Gráfica, 2006.
- CEAC, Turbocompresores, Grupo Editorial CEAC, Barcelona, 1992.
- GIACOSA DANTE, Motores endotérmicos de encendido por compresión, Editorial Dossat, Barcelona – España, 1979.

- MIRALLES DE IMPERIAL JUAN, CEAC, Turbo, sobrealimentación de motores rápidos, Grupo Editorial CEAC, Perú, 1989

- M.S.JOVAJ, Motores de automóvil, Editorial Mir, 1979

VII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos nuestros amigos por ser un eje de apoyo en nuestra vida universitaria. A todos los maestros por haber compartido sus conocimientos y sabios consejos. Igualmente a todas las personas que estuvieran cerca de nosotros apoyándonos para llegar a culminar este proyecto satisfactoriamente.

I. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LOS PARÁMETROS INDICADOS Y EFECTIVOS DEL MOTOR DIESEL

1.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos en el diseño de motores de alta prestación está orientado hacia la disminución de emisiones. Esto es motivado por las crecientes restricciones tanto en la norma europea como americana en cuanto a los niveles de emisiones de monóxido de carbono, óxido nítrico y otros contaminantes generados por un número cada vez mayor de vehículos que funcionan ya sea mediante ciclo Diesel u Otto. Por otra parte, los esfuerzos por mejorar el rendimiento, aumentar la potencia, disminuir el consumo específico de combustible y mejorar los combustibles actuales sustentan las fuertes inversiones en el desarrollo de nuevos conceptos para poder salvaguardar la infraestructura montada alrededor de la producción y comercialización de motores a explosión. Esta última amenazada por el incipiente avance de la propulsión eléctrica en vehículos híbridos de la mano de la optimización de las ya utilizadas celdas de combustible.

El avance en la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos que ocurren dentro de la cámara de combustión de un motor ha sido lento, fundamentalmente a causa de la falta de equipamiento adecuado para observar este tipo de fenómenos. Los regímenes de giro cada vez mayores de las máquinas actuales, sumado a la alta turbulencia generada en los cilindros y ductos, y a la rapidez de las reacciones químicas, hacen extremadamente compleja la observación de los fenómenos que ocurren dentro del cilindro.

En los últimos años ha habido avances en el equipamiento de laboratorio utilizado para este fin pero los ensayos experimentales resultan de un costo elevado e insumen demasiado tiempo.

1.2. CALIDAD DE LA FORMACIÓN DE LA MEZCLA Y TIPOS DE CÁMARA DE COMBUSTIÓN

El movimiento de la carga dentro del cilindro de motores de combustión interna es uno de los factores más importantes afectando la producción de turbulencia. En motores de 4 válvulas, la configuración de las mismas origina un movimiento de la carga alrededor de un eje normal al eje del cilindro.

En el diseño de motores alternativos de alta performance tres números adimensionales juegan un rol dominante estos son: el coeficiente de descarga, el índice de swirl y tumble.

El primero es una medida de las pérdidas de presión introducidas por la combinación válvula, conducto de admisión y cilindro;

El segundo es un índice del movimiento rotacional de la carga alrededor de un eje que es paralelo al eje del cilindro, mientras que el tercero es un índice del movimiento rotacional de la carga alrededor de un eje normal al eje del cilindro.

Cabe destacar que existe una competencia entre el coeficiente de descarga y los índices de swirl y tumble. Una modificación en un conducto en post de mejorar el índice ya sea de swirl o de tumble, trae aparejado un aumento de pérdida de carga, con su consiguiente reducción de coeficiente de descarga.

No obstante, en el motor, no necesariamente se traduce en una pérdida de potencia, ya que si bien la cantidad de carga introducida va a ser menor, la calidad de la misma resulta superior, favoreciendo la evolución del frente de llama.

Un cuarto número adimensional, conocido como índice de Mach, también proporciona valiosa información acerca del flujo en el conducto de admisión. Es una medida de la velocidad del flujo en el conducto, promediada en todo el

intervalo de apertura de la válvula. Permite evaluar la eficiencia del motor para distintas alzadas y diámetros de válvulas.

En el motor de ciclo Diesel la formación de la mezcla y el tipo de cámara de combustión depende de una serie de factores, de los cuales los más importantes son los siguientes:

- Los parámetros del equipo de inyección de combustible, determinados por la caracterización de inyección, el suministro de combustible en tiempo, la calidad de pulverización, la profundidad del chorro en la cámara y la forma que tiene el chorro.
- La organización del movimiento dirigido del aire en el periodo de inyección de combustible.
- Parámetros termodinámicos del medio.
- Propiedades del combustible.

En función del carácter que tenga la formación de la mezcla se distinguen los siguientes procedimientos de formación de la mezcla.

- En el volumen de la cámara de combustión (formación volumétrica de la mezcla), cuando el combustible se inyecta directamente en el medio de aire en movimiento, además se supone que aquel no tocara las superficies que limitan la cámara de combustión.

En este caso el combustible puede inflamarse en unas cuantas zonas donde las temperaturas son más elevadas y la composición de la mezcla se encuentra en los límites de concentración para los cuales resulta posible inflamar el combustible.

- La mayor parte del combustible inyectado cae sobre la superficie caliente de la cámara de combustión en forma de una fina película (formación pelicular de la mezcla), y solo una pequeña parte

(aproximadamente el 5%) se pulveriza en el volumen de la cámara de combustión.

Durante la inflamación de la porción de combustible que se encuentra en el volumen de la cámara de combustión, la película de combustible se volatiliza y los vapores de combustible, por efecto del intenso movimiento del aire se mezclan con este y se trasladan a la zona donde tiene lugar la combustión.

También existe el método de formación de la mezcla aire-combustible, en el cual gran parte del combustible inyectada va a parar al volumen de la cámara de combustión situada cerca de las paredes (capa superficial) donde se realiza la vaporización del combustible.

En vista de que la cantidad de combustible evaporada en esta zona sobrepasa el límite superior de concentración de la mezcla (mezcla sobre enriquecida), la inflamación del combustible resulta imposible.

El combustible evaporado se arrastra por la carga de aire en movimiento trasladándose hacia el centro de la cámara y paulatinamente comienza a participar en la reacción de combustión. Para este método de mezclar los vapores de combustible con el aire, la presión se eleva gradualmente durante el proceso de combustión.

- La formación de la mezcla volumétrico-pelicular, en la cual una parte del combustible durante el proceso de inyección va a parar al volumen de la cámara de combustión y la otra parte cae sobre su superficie.

1.2.1. TIPOS Y CLASIFICACIÓN DE LAS CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.

La mezcla de combustible y aire debería quemar en forma uniforme y progresiva, puesto que una detonación violenta de la mezcla provoca un estado de marcha desigual, el llamado “picado diesel”. Para lograr la combustión correcta, el combustible y el aire deben mezclarse adecuadamente. En los motores en que ese combustible se inyecta directamente a la cámara de combustión, se obtiene una mezcla más eficaz creando una turbulencia en el aire del interior del cilindro a medida que se comprime. Esto suele hacerse perfilando la cabeza del embolo de forma que obligue al movimiento del aire durante su compresión.

En otros tipos de motor hay unas cámaras de turbulencia o cámaras de precombustión para mejorarla. Una cámara de turbulencia es una pequeña cámara esférica, situada encima o a un lado de la cámara principal de combustión y conectada con ella por una lumbrera. Cuando se comprime el aire del cilindro se obliga a que una parte del mismo pase a esa cámara de turbulencia, donde se crea un efecto de torbellino debido a su forma. El combustible es inyectado en esta cámara, donde se produce una combustión preliminar que fuerza a la mezcla a salir hacia la cámara principal, donde se completa su combustión.

La cámara de precombustión, en la que se inyecta el combustible, está unida a la cámara principal mediante una serie de estrechos pasos; parte de la mezcla de esta primera cámara se inflama y expansiona, forzando a la restante mezcla, no encendida, a través de los pasos de conexión, hasta la cámara principal, donde llegan como una fina pulverización que arde de modo uniforme.

Según el tipo de cámara de combustión los motores Diesel pueden clasificarse como sigue:

- Con cámara de inyección directa.

- Con cámara arremolinadora.
- Con cámara de combustión con depósito de aire.
- Con antecámara de combustión.

1.2.1.1. Con cámara de inyección directa.

El combustible se inyecta directamente en el cilindro. La culata cierra el cilindro con una superficie plana, mientras que el inyector está situado en el centro.

El inconveniente principal de este tipo de motor radica en que el aire está poco agitado, siendo el inyector el responsable exclusivo de la mezcla, por lo que su fabricación ha de ser muy perfecta, y por lo tanto costosa.

En estas condiciones, y para aprovechar al máximo la combustión, es conveniente que la cámara adopte la forma del chorro de combustible, o a la inversa.

La velocidad de movimiento dirigido del aire al final de la compresión es la mínima y en función de la frecuencia de rotación alcanza aproximadamente en el periodo de inyección 0-10 m/s.

En este tipo de cámara se utilizan inyectores de varias toberas, con un gran número de agujeros, hasta siete por inyector, de pequeño diámetro 0,12 a 0,15 mm. En la fase de la inyección se crea una elevada presión de inyección de alrededor de 100 MPa y más.

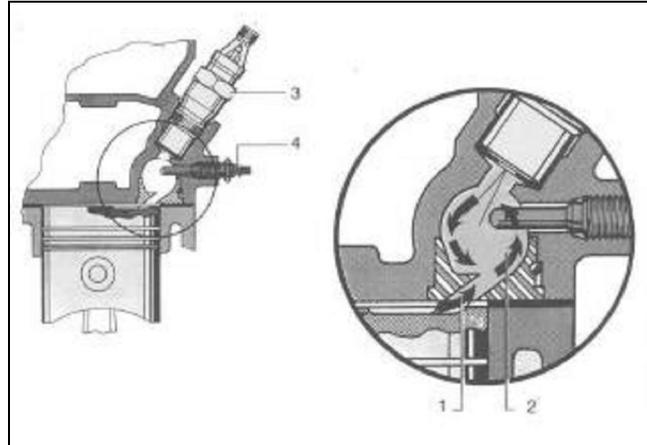


Figura 1.1. Cámara de inyección directa
1 Canal de encendido, 2 Cámara de turbulencia,
3 Inyector, 4 Bujía de precalentamiento.

1.2.1.2. Con cámara arremolinadora.

El motor Diesel rápido con diámetro de cilindro pequeño plantea el problema de obtener una mezcla rápida y homogénea de combustible y aire. Para lograrlo se lleva el aire al combustible, dotando a este de un movimiento de remolino, lo que provoca una fuerte turbulencia al llegar el embolo a su punto muerto superior.

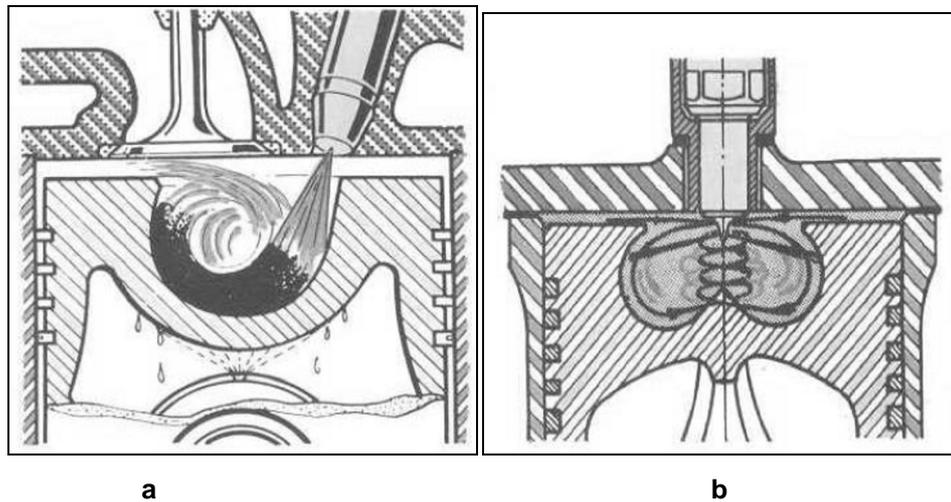
En una cámara de combustión con turbulencia, al ser aspirado el aire es enviado tangencialmente, por lo que la válvula de aspiración lleva una especie de pantalla que guía adecuadamente la corriente de aire.

Además de este movimiento existe otro transversal que impulsa al embolo dentro de la cámara.

El movimiento tangencial del aire en el proceso de compresión permite:

- Inyectores con menor número de agujeros (3 y 4).
- Disminuir la presión de inyección hasta 15-17 MPa.

Las cámaras arremolinadoras también pueden estar separadas, en ellas, la cámara de combustión esta por entero fuera del cilindro; el espacio entre embolo y culata, al hallarse aquel en el punto muerto superior, es únicamente el preciso para permitir las dilataciones propias del funcionamiento. En este caso, la cámara tiene forma de esfera.



a
Figura 1.2. a. Inyección directa sin turbulencia sistema Sauter.
b Inyección directa con turbulencia sistema Mazda.

1.2.1.3. Con cámara de combustión con depósito de aire.

Este tipo de cámaras se llaman también de acumulación. El depósito de aire está constituido por una pieza postiza situada en el embolo, la cual comunica con la cámara de combustión a través de un orificio. Durante la compresión el aire se introduce en el depósito. Antes de alcanzarse el punto muerto superior comienza la inyección. Al pasar del punto muerto superior el movimiento del embolo se invierte, aumenta el volumen de la cámara de combustión y disminuye la presión que había en ella. El aire sale a través del orificio alimentando la llama en la zona del embudo y originando la combustión completa del combustible inyectado.

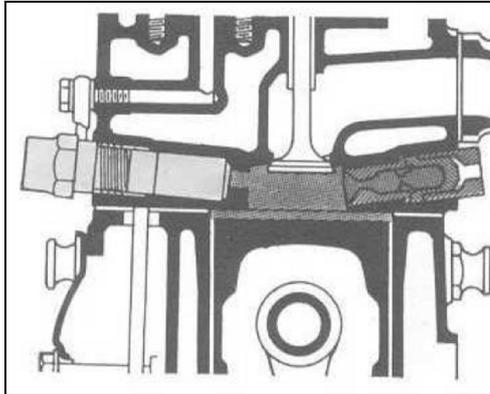


Figura 1.3. Cámara de combustión con depósito de aire

1.2.1.4. Con antecámara de combustión.

Estos motores se denominan también de combustión dividida o de precombustión.

Se caracterizan por tener el espacio en que se desarrolla la combustión dividido en dos: por una parte la cámara comprendida entre la cabeza del embolo y la culata, y por otra la antecámara, situada generalmente en la culata.

En este tipo de cámara el funcionamiento es como sigue: al final de la carrera de compresión se inyecta el combustible. Parte de este combustible arde en la antecámara, aumentando la presión; el combustible que queda sin arder es proyectado, a través de un orificio de la antecámara, a la cámara principal. En esta encuentra el aire que precisa para completar la combustión.

La principal ventaja de este sistema consiste en que se puede inyectar combustible a presiones relativamente bajas: de 80 a 160 atmósferas, en vez de las 250 – 350 necesarias en la inyección directa.

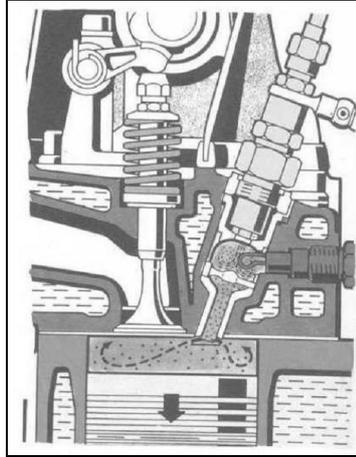


Figura 1.4. Cámara con precombustión sistema Mercedes – Benz

1.2.2. COMPARACIÓN ENTRE LAS DIVERSAS CÁMARAS.

La cámara de inyección directa es, desde el punto de vista constructivo, la más sencilla y económica. En general, es preferible cuando las dimensiones del motor permiten el uso de toberas con orificios de diámetro suficiente para evitar peligros de taponamiento. En principio conviene que su diámetro sea, como mínimo, de 100 mm.

Por el contrario, para motores con menor diámetro es preferible el empleo de cámaras arremolinadoras; y para motores pequeños y rápidos las más indicadas son las cámaras de inyección indirecta, o sea con depósito de aire, y las antecámaras.

Resumamos en la tabla I.1 las ventajas y desventajas de la inyección directa e indirecta.

Tabla I.1. Ventajas y Desventajas de la Inyección Directa y la Inyección Indirecta

Características	Inyección directa	Inyección indirecta
Consumo de combustible	Menor	Mayor
Coefficiente de exceso de aire	Mayor	Menor
Grado de compresión	Menor	Mayor
Presión de inyección	Mayor	Menor
Potencia específica	Menor	Mayor
Facilidad de arranque	Mayor	Menor
Humos en el escape	Mayor	Menor
Flexibilidad del motor	Menor	Menor

Los motores con precámara de alta turbulencia son los que han dado un gran paso para los automóviles actuales.

En los motores de inyección indirecta, la alta turbulencia conseguida en la precámara, así como las elevadas relaciones de compresión, permiten alcanzar revoluciones altas, junto con un nivel de ruidos y vibraciones moderado.

En los sistemas de inyección directa, como no existe precámara, no hay pérdidas expuestas y el rendimiento del motor aumenta. La revolución de compresión puede ser más baja, reduciéndose así las pérdidas por rozamiento, ya que en la inyección directa no es necesario bombear el aire hacia adentro y hacia fuera de la precámara.

Los motores de inyección directa son aproximadamente un 15 % más eficientes que los de inyección indirecta, y más simples en cuanto al arranque, al tener menos pérdidas de calor. La combustión es más completa y el motor desprende menos humos. Ahora bien, su aplicación en los motores rápidos ha tenido que sobreganar dos problemas: los ruidos y vibraciones y el arranque en frío.

1.2.3. PROCESO DE COMBUSTIÓN EN EL MOTOR DIESEL

Se denomina combustión al fenómeno que tiene lugar al explotar el gas combustible que se halla en el interior del cilindro.

La combustión se produce en el tiempo de expansión, o sea en el tercer tiempo del ciclo del motor.

1.2.3.1. Combustión homogénea

El combustible es inyectado en estado líquido, en forma de chorro pulverizado en el interior del recinto de combustión, después de la compresión. Las pequeñas gotas de la periferia del dardo de inyección se vaporizan al entrar en contacto con el aire, pues se encuentra a elevada presión (Diesel sobrealimentados puede ser de 80 bares) y temperatura (alrededor de 1000 K) debido a la carrera de compresión a la que ha sido sometido por el pistón.

Al vaporizarse el combustible entra en contacto con el oxígeno contenido en el aire y pasado un determinado tiempo, la mezcla se autoinflama. Esta autoinflamación es un proceso que se inicia espontáneamente y es debido a que la interacción entre gota y comburente permite que este último ceda suficiente energía como para que se inicie la reacción de combustión. En consecuencia, la combustión puede iniciarse en cualquier punto del recinto de combustión o en más de uno a la vez.

Este tipo de combustión se realiza sobre una mezcla globalmente heterogénea, ya que el inyector introduce el combustible concentrado en la zona del dardo de inyección, diluyéndose a medida que nos alejamos de su eje longitudinal, con lo que existen zonas de exceso de combustible y otras con defecto

fuera de los límites de inflamabilidad y otras que sí serán inflamables.

1.2.3.2. Combustión normal y combustión anormal.

Combustión normal, al producirse la inyección el combustible pulverizado procedente del inyector se calienta con el aire comprimido y se mezcla con él. La combustión se extiende a toda la mezcla y la presión en el interior del cilindro aumenta. Esto es lo que se llama combustión normal, pues el encendido se produce en instante previsto.

Combustión anormal, por el contrario, es la que, al no proceder el chorro de combustible del inyector, no se realiza en el instante previsto. Las causas pueden ser un contacto de superficie o el autoencendido.

En el primer caso se produce, la mayoría de las veces, un calentamiento excesivo de la válvula de escape, lo que produce pérdida de potencia, funcionamiento ruidoso e irregularidades en la marcha, así como el encendido de residuos de la mezcla que no han sido expulsados en el tiempo de escape.

Esta anomalía se evita mejorando la refrigeración del motor y procurando que no se formen depósitos carbonosos.

En cuanto a la combustión anormal por autoencendido, se da al producirse la “detonación” o combustión espontánea de la mezcla que queda en la cámara. Esto repercute en el sistema de refrigeración, ya que este no puede eliminar todo el calor producido, lo que causa calentamientos excesivos.

1.3. RELACIÓN DE COMPRESIÓN

En el motor Diesel la relación de compresión es mucho más elevada que en el motor de gasolina, pues se comprime el aire, de modo que se elimina el peligro de autoencendido, al no comprimirse el combustible.

El rendimiento del motor mejora a medida que aumenta la relación de compresión. Sin embargo, a partir del grado de compresión 15 el aumento del rendimiento es menor y la curva se hace más plana.

Esto provoca presiones muy fuertes en interior del cilindro, lo que exige un motor más robusto y, en consecuencia, más pesado y más caro.

Por lo tanto, en motores medianos o grandes de menos de 750 rpm, la relación de compresión debe oscilar entre 12 y 14, y en motores pequeños entre 14 y 22.

1.4. ANGULO DE AVANCE A LA INYECCIÓN

Es el ángulo entre el comienzo de la inyección de combustible y el PMS. Durante un pequeño lapso de tiempo después de la inyección la combustión no empieza debido a que la compresión se desarrolla todavía

El combustible se inyecta al aire comprimido caliente, cuya temperatura fluctúa entre 450 a 550 °C y la presión entre 3 a 4 MPa.

La alimentación comienza antes del PMS y puede terminar antes del PMI o después de él.

Desde el momento en que se inyecta el combustible hasta que se este se combustiona se presentan fenómenos y procesos que se desarrollan en la carrera

de compresión y expansión, a continuación detallamos esos fenómenos y procesos.

1.4.1. RETRASO A LA INFLAMACIÓN

Es el intervalo de tiempo (en grados de rotación del cigüeñal), entre el ángulo de avance a la inyección y la elevación de la presión del ciclo como consecuencia de la combustión en ausencia de inflamación, o como comienzo de la combustión.

El tiempo de retardo a la inflamación depende de la pulverización, la turbulencia, la relación de compresión y la temperatura.

Durante el retardo a la inflamación se acumula el combustible que se evapora para formar la mezcla.

La cantidad de combustible acumulada origina que gran cantidad de calor sea liberada con características de quemado dominadas por el premezclado.

En el resto del proceso el combustible que aun ingresa se quema en un periodo de tiempo más prolongado, el mezclado es dominante durante la combustión.

1.4.2. FASES DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

1.4.2.1. Retraso al encendido

El combustible es inyectado directamente en el cilindro cerca del final de la carrera de compresión. El combustible líquido es pulverizado y dispersado, penetra dentro de la cámara de

combustión. El combustible se vaporiza y mezcla con la alta temperatura y alta presión del aire. (Figura 1.6. ab)

1.4.2.2. Fase de combustión de premezclado

El combustible mezclado entra en los límites de inflamabilidad (presión y temperatura del aire elevados), durante el retraso al encendido, el periodo ocurre rápidamente en unos pocos ángulos de giro del cigüeñal. (Figura 1.6. bc)

1.4.2.3. Fase de combustión controlada de la mezcla

Después del premezclado del gas consumido, la tasa de encendido es controlada por la transformación de la mezcla disponible de llama, la tasa de inflamación en esta fase es controlada primordialmente por el proceso de mezcla del aire-combustible. (Figura 1.9. cd)

1.4.2.4. Fase posterior a la combustión

El calor desprendido como es de esperarse baja la tasa de expansión dentro del ciclo (no existe inyección de combustible adicional). (Figura 1.6. de)

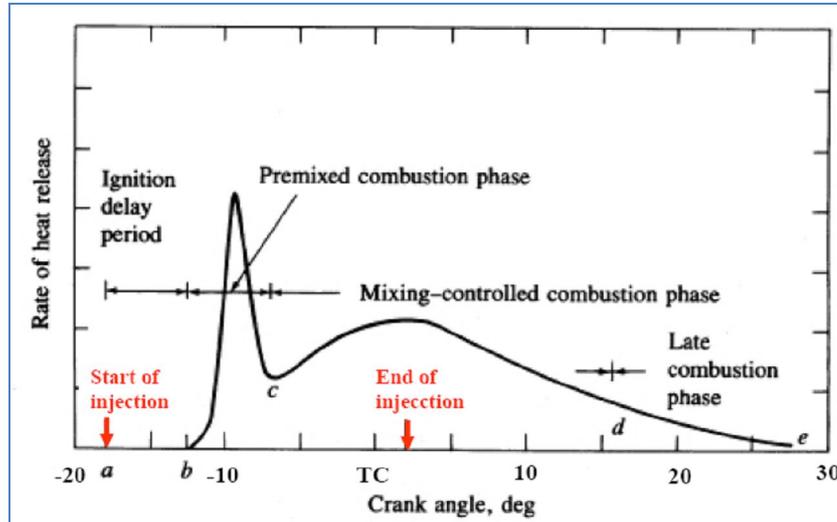


Figura 1.5. Diagrama de razón de calor liberado para motores de encendido por compresión.

1.4.3. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA PARED DEL INTERIOR DEL CILINDRO.

La temperatura en las paredes varía al acercarse el frente de llama dependiendo de las características de transferencia de calor.

Aunque este comportamiento es similar para todas las paredes aunque su magnitud no es la misma.

Su máximo valor se alcanza durante la combustión. Los máximos valores se consiguen cuando el motor trabaja con mezclas con riqueza cercana a 1.0

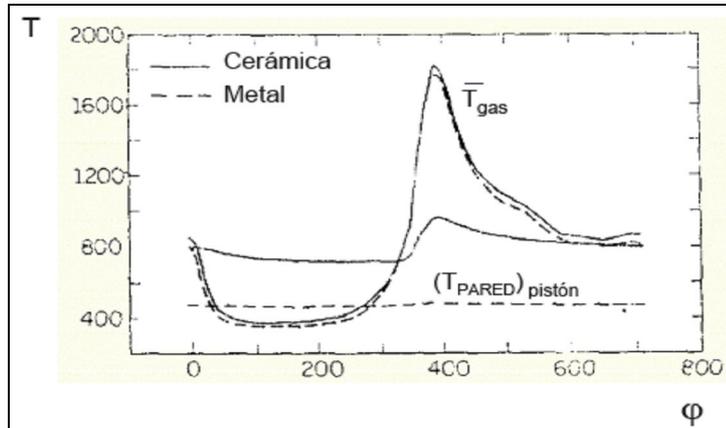


Figura 1. 6. Variación de la temperatura en la pared de la cámara con y sin recubrimiento cerámico.

1.5. FRECUENCIA DE ROTACIÓN

Al aumentar la frecuencia de rotación mejora la calidad de pulverización del combustible, crece la velocidad del movimiento del aire y la temperatura al final de la compresión.

Con el aumento de n , mejoran los parámetros indicados del motor, esto provoca el mejor rendimiento de la fase de combustión rápida.

1.6. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE MOVIMIENTO DE LA MEZCLA DE TRABAJO

Este movimiento, llamado tumble, es originado durante la carrera de admisión y continua a lo largo de la carrera de compresión, donde el movimiento del pistón produce la distorsión, aceleración y posterior degradación del macro vórtice, resultando en un incremento en la energía cinética.

1.6.1. TURBULENCIA

La turbulencia consiste en vórtices de diferentes tamaños ordenados de forma aleatoria, que se superponen con el flujo de mezcla de

combustible. Estos vórtices junto con la corriente del flujo, representan una superficie con irregulares pequeñas que desarrolla un movimiento espiral de concentración.

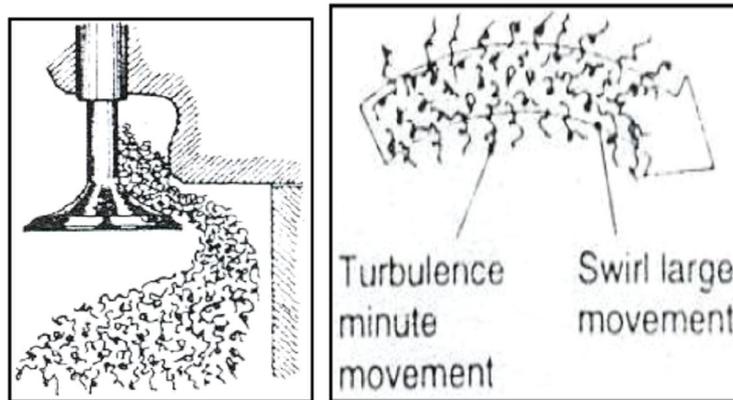


Figura 1.7. Comportamiento de la turbulencia

A medida que los vórtices giran, entran en contacto con vórtices adyacentes, y se generan tensiones de corte por la viscosidad. Se acelera la mezcla entre el combustible y el aire, y la transferencia de calor. Esta situación es opuesta a la que ocurre en flujo laminar, donde la transferencia de calor por la difusión molecular es relativamente lenta, y la mezcla del combustible con el aire se ha realizado antes de ingresar al cilindro. La formación de nuevos vórtices y la desintegración de otros, aumenta el flujo turbulento al aumentar el régimen del motor.

1.6.2. PROPAGACIÓN DEL FRENTE DE LLAMA

Si la mezcla inducida se mueve dentro del cilindro como flujo laminar estable, en el instante que la temperatura del aire comprimido es la ideal, se produce de la inflamación de las moléculas del combustible, el aumento de la temperatura por convección y radiación calienta las moléculas adyacentes, hasta que estas también entran en combustión.

Al mismo tiempo, aumentar la temperatura acelera el movimiento aleatorio de las moléculas de gas produciendo cada vez más choques

entre sí mismas y con otras moléculas adyacentes de la mezcla inquemada. El aumento de presión resultante genera una expansión de las moléculas encendidas que ayudan a propagar la inflamación.

Desafortunadamente, la velocidad de propagación el frente de llama hacia la fracción de mezcla sin quemar sería muy lento y no se podría completar la combustión a tiempo (la combustión no se completa con suficiente anticipo al inicio de la carrera de expansión, generando reducida fuerza de impulsión).

Sin embargo la mezcla aire-combustible contenida en el cilindro estará normalmente en un estado combinado de swirl y tumble, naturaleza que consiste en vórtices y pulsaciones aleatorias de velocidad en la mezcla de gas.

Las velocidades típicas de propagación de la llama están en el rango de 15 a 70 m/s. Es decir, la velocidad es aproximadamente 15 m/s para un régimen de 1000 rpm y aumenta a 70 m/s para un régimen de 6000 rpm.

El intervalo del tiempo para completar la combustión depende de la intensidad de la turbulencia, que a su vez depende del régimen del motor. Así, si el proceso de la combustión abarca un ángulo de giro del cigüeñal de 30° a 1000 rpm (para un nivel de turbulencia dado), entonces a 2000 rpm y con la misma intensidad turbulenta el ángulo de giro del cigüeñal se habrá duplicado a 60°, movimiento angular inaceptable.

Sin embargo, si el régimen del motor y consecuentemente la turbulencia se duplica, el intervalo de tiempo de combustión se reduce a la mitad, entonces cuando el régimen del motor aumenta de 1000 rpm a 2000 rpm el ángulo giro del cigüeñal se mantiene aproximadamente constante en su valor original de 30°. Por lo tanto, sin turbulencia, el motor de encendido por chispa sería incapaz de operar en el rango de velocidades necesarias.

1.6.3. FLUJO A TRAVÉS DEL CONJUNTO DUCTO - VÁLVULA DE ADMISIÓN

Cuando la velocidad del flujo que atraviesa un orificio alcanza la velocidad del sonido local (los cambios de presión aguas abajo del orificio ya no se podrán propagar aguas arriba del mismo). Esto se debe a que la onda de presión se desplaza a la velocidad del sonido y el flujo entrante, en sentido contrario a la onda de presión, viaja a la misma velocidad. Así, el flujo se denomina estancado, y el flujo másico no se podrá incrementar por encima de este punto.

Si llamamos V a la velocidad instantánea del flujo y a la velocidad del sonido local, el número de Mach M se define como:

$$M = \frac{V}{a}$$

En el caso de que $M = 1$, el flujo está estancado y no puede ser incrementado.

El estancamiento del flujo que atraviesa la válvula de admisión (es decir, cuando alcanza la velocidad del sonido) es una de las más serias limitaciones de performance del motor. El diseño del conjunto ducto y válvula de admisión está dirigido en gran parte a evitar el estancamiento del flujo en el rango de performance deseado.

Para controlar el régimen del motor en el cual el flujo llega a la condición de estancado, el diseñador debe controlar el número, tamaño y alzada de las válvulas de admisión, como así también la influencia de estos tres parámetros sobre la cámara de combustión.

1.6.4. FLUJO A TRAVÉS DE LA VÁLVULA DE ADMISIÓN

La naturaleza del flujo que atraviesa la válvula de admisión se puede examinar para tres alzadas de válvula: baja, media y alta. Tomamos como referencia una válvula con aristas filosas, que son las típicas en los motores de producción en serie.

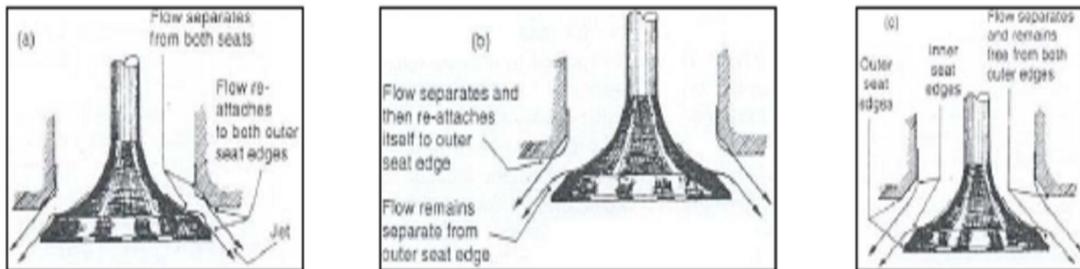


Figura 1.8. Flujo a través de la válvula de admisión

En la alzada más baja, el flujo se separa de las aristas interiores tanto del asiento como de la válvula, y vuelve a entrar en contacto con los bordes exteriores del asiento y válvula, Fig. A.

Para la alzada media, el flujo se separa de las aristas interiores tanto del asiento como de la válvula, vuelve a entrar en contacto con el borde exterior del asiento, pero se mantiene el desprendimiento en las aristas exteriores de la válvula, Fig. B.

Al llegar a la alzada más alta, el flujo se separa en las aristas interiores del asiento y válvula, permaneciendo así a medida que se descarga en trayectoria cónica, Fig. C. Se forma así un jet de flujo libre.

1.6.5. FLUJO EN EL CILINDRO

De acuerdo a la forma y ubicación de los ductos y válvulas de admisión, y a distribución del motor, es posible inducir en el cilindro flujos intermedios. El flujo en el cilindro es siempre turbulento, pero la velocidad

media es menor que la velocidad turbulenta. Movimientos de este tipo suelen llamarse coherentes, y se debe a que presentan cierta organización en la turbulencia desorganizada. Al hacer mediciones, las mismas se deben realizar cierto número de ciclos, entre 20 y 30, y finalmente promediar las mismas para determinar el modulo del flujo organizado.

El tumble y el swirl son 2 tipos de movimientos coherentes que es posible inducir en el cilindro. También es posible inducir una combinación de los dos movimientos. De hecho, es casi imposible inducir swirl sin inducir algo de tumble, por ello los dos están casi siempre asociados. En cambio, si es posible inducir tumble sin llegar a inducir swirl.

1.6.5.1. Tumble

Es característico de los motores con cuatro válvulas por cilindro, y consiste en un movimiento de rotación alrededor de un eje que es normal al eje del cilindro.

Se ha observado que este movimiento de rotación se descompone en micro turbulencia a medida que el pistón se acerca PMS., aumentando la energía cinética turbulenta dentro del cilindro.



Figura 1.9. Tumble

1.6.5.2. Swirl

Es el movimiento típico de la carga en los motores con dos válvulas por cilindro, es un movimiento de rotación alrededor del eje del cilindro.

Dependiendo del diseño de la cámara de combustión, no siempre se descompone en micro turbulencia en el PMS., no obstante esta elección es una estrategia del diseñador.



Figura 1.10. Swirl

1.7. INFLUENCIA DEL HUELGO ENTRE LA CABEZA DEL PISTÓN Y LA CULATA

El huelgo influye principalmente cuando se utilizan cámaras de combustión semiseparadas

Al disminuir el huelgo entre la cara del pistón, aumenta el volumen de la cámara que existe en el pistón con respecto a la cámara de combustión. Debido a que existe más aire los índices del motor mejoran.

Esto está limitado hasta la imposibilidad de que el pistón toque la culata y las válvulas cuando se encuentra en el PMS.

Al disminuir el huelgo disminuyen las emisiones de humos en el motor diesel, consecuencia del aumento de la temperatura y aumento de la presión del ciclo la

cantidad de óxidos de nitrógeno aumentan a medida que disminuye el huelgo entre la cabeza del pistón y la culata.

1.8. PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE

Los combustibles para el ciclo Diesel son los diesel oils y los gasoils, parafínicos con buenas características de autoencendido; los diesel oils para automotores auto encienden entre los 180 y 350 °C, y los gasoils para motores marinos entre 220 y 370 °C.

1.8.1. REQUISITOS

Los requisitos generales son:

- Buen arranque en frío (volatilización)
- Atomización (viscosidad)
- Suavidad de marcha (retardo, constancia del retardo)
- Residuos (fracciones pesadas, aditivos)
- PCI (eficiencia)
- Limpieza del sistema (inyectores, aditivos)
- Viscosidad y volatilidad (bomba, filtros).

1.8.2. COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE DIESEL

Los parámetros que rigen la composición del combustible diesel son: Índice Cetano, Densidad, Viscosidad, Azufre, Aromáticos, Características de Destilación T90.

1.8.2.1. Número e índice de cetano

El número de cetano es una medida de comportamiento de ignición frente a la compresión del combustible; en ella influye la partida en frío, la combustión y el ruido. El índice natural de cetano

de un combustible, es calculado en base a las propiedades medidas del combustible. El número de cetano es medido sobre un motor en prueba y refleja los efectos del cetano y sus aditivos. Los niveles de cetano natural son afectados por el desempeño del vehículo en diferentes etapas de comportamiento.

1.8.2.2. Densidad y viscosidad

El motor diesel se abastece por inyección controlada volumétricamente ó mediante la regulación de la válvula solenoidal. Las variaciones de densidad y viscosidad son producto de variaciones en la carga motor, y por consiguiente en el consumo de combustible y emisiones del motor. El programa europeo EPEFE demostró que la densidad del combustible influye en la inyección ya sea regulada ó controlada mecánicamente, debido a que produce efectos sobre el consumo adicional de combustible y sobre las emisiones. Por lo tanto para perfeccionar el desempeño del motor y las emisiones del tubo de escape, es necesario definir límites de densidad.

1.8.2.3. Azufre

El azufre naturalmente está presente en el petróleo crudo. Si al azufre no es removido en el transcurso del proceso de refinación, éste contaminaría al combustible del vehículo. El azufre del combustible diesel contribuye significativamente a las emisiones de partículas finas de MP, mediante la formación en conjunto de sulfatos y descarga de vapor, que posteriormente se descargan a la atmósfera. El azufre puede producir corrosión y desgaste en el motor. Por lo tanto, la eficiencia en los sistemas de descarga se reduce en los contenidos de azufre después de un tratamiento.

1.8.2.4. Aromáticos

Los aromáticos son las moléculas del combustible que contienen por lo menos un anillo de benceno. El contenido de aromáticos en el combustible afecta a la combustión y a la formación de particulado y emisiones de PAH.

El contenido de aromáticos en el combustible diesel influye en la temperatura de la llama, y por lo tanto en el transcurso de la combustión en las emisiones de NO_x . Los Poli aromáticos en el combustible afectan a la formación de emisiones de MP y PAH.

1.8.3. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y EL RENDIMIENTO DEL COMBUSTIBLE

La relación entre las propiedades físicas y el rendimiento del combustible se sintetiza en lo siguiente:

1.8.3.1. Viscosidad

Controla el tamaño de gota, la penetración, dando mala combustión si el rocío es muy fino, y lavado del aceite si es muy grueso. Afecta al desgaste de la bomba inyectora.

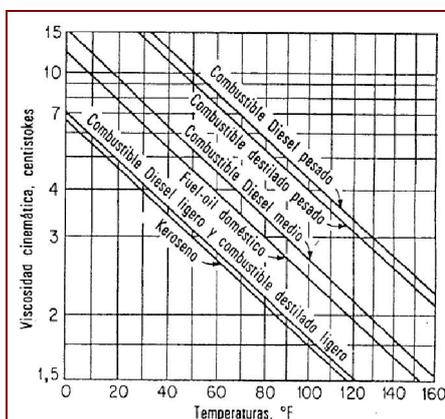


Figura 1.11. Viscosidad de combustibles

1.8.3.2. Punto de escurrimiento, enturbiamiento

Importante para motores marinos y militares que pueden operar a muy bajas temperaturas. Importan la relación viscosidad/temperatura y el contenido de parafina.

1.8.3.3. Estabilidad

Relacionado con la formación de gomas y barnices. Limpieza.

1.8.3.4. Peso específico

Relacionado con la facilidad de encendido y la densidad de energía.

1.8.3.5. Punto de inflamación

Peligro de incendio si es muy bajo: el combustible Diesel auto enciende.

1.8.3.6. Impurezas

Importante para la vida de bombas e inyectores.

1.9. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS EFECTIVOS DEL MOTOR EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES DEL MEDIO AMBIENTE

La disminución de la presión y la temperatura atmosférica afecta a la densidad del aire y su composición, y en consecuencia, a las prestaciones de toda máquina térmica.

El rendimiento indicado disminuye con la altitud debido principalmente a que la presión en el cilindro es menor a lo largo de todo el ciclo del motor, si bien otros efectos relacionados con la incorporación del combustible también influyen. Todo ello provoca una pérdida de potencia indicada. Aunque la potencia de pérdidas mecánicas se reduce ligeramente con la altitud debido a que la potencia de pérdidas de bombeo y la de rozamiento se reducen por la disminución de la contrapresión de escape y de presión en el cilindro respectivamente, esta disminución es mucho menos significativa que la de la potencia indicada.

Con el fin de establecer una base de comparación común es necesario aplicar factores de corrección para convertir la potencia en el terreno a potencia en condiciones estándar y viceversa. Esta corrección suele ser del tipo:

$$\frac{N_i}{N_{i0}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^a \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^b$$

Donde N_i , p y T son la potencia indicada, presión y temperatura del lugar de operación respectivamente, el subíndice 0 indica condiciones de referencia (normalmente 0 msnm).

La corrección por humedad se suele incorporar en el término de presión, restando de ésta la presión del vapor de agua atmosférico. En este trabajo no se aborda dicho efecto, que con diferencia influye menos sobre las prestaciones del motor que la presión y temperatura.

Los valores de los exponentes a y b varían según el tipo de motor y las condiciones de operación. Éstos no provienen de un análisis teórico de las ecuaciones, sino que obedecen a un ajuste experimental para correlacionar el tipo de motor y las condiciones atmosféricas. El exponente a suele tomar el valor de la unidad para motores diesel.

El exponente b suele variar entre -0.5 y -1 para motores de aspiración natural independientemente del tipo de aplicación, estacionaria o automoción, mientras que para motores sobrealimentados suele tomar valores mayores que la unidad.

Este factor de corrección se recomienda para un rango de presiones entre 0.8 y 1 bar y un rango de temperaturas entre 288 y 308 K.

En la práctica, los valores más usados en la literatura para motores de aspiración natural son $a = 1$ y $b = -0.5$, que se justifica por la dependencia directa entre la potencia y el gasto admitido, el cual depende del producto.

$$P_{adm} * T_{adm}^{-0.5}$$

Para contrarrestar lo anterior, se han desarrollado diversos métodos para compensar el efecto de la altitud en sus motores, tales como la implementación de la turbo alimentación o el uso de sensores barométricos que retroalimentan a la unidad de control electrónico para que actúe corrigiendo los parámetros de la inyección de combustible. Se han implementado algunos métodos de corrección por presión barométrica que no requieren el uso de sensores adicionales. Estos utilizan algoritmos de cálculo basados en las ecuaciones de flujo compresible a través de una restricción. Las entradas al algoritmo se obtienen de los sensores existentes en el motor.

1.9.1. COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DEL AIRE

La hipótesis es suponer que el aire tenga un comportamiento de gas ideal, ya que el factor de compresibilidad del aire, cuando la presión es inferior a 1 atm y la temperatura rara vez sobrepasa los límites $[-20,50]$ °C, es muy próximo a la unidad, y por tanto, el error cometido al considerarlo como gas perfecto es muy pequeño. Expresada en función de la densidad, r , la ecuación de estado del gas ideal (siendo AR la constante másica del aire):

$$p = \rho R_a T$$

La hipótesis más sencilla consiste en suponer que la temperatura es uniforme al variar la altitud. Sin embargo, esta hipótesis puede no ser muy precisa ya que es conocida la reducción de temperatura del aire con la altitud a lo largo del espesor de la troposfera (algo más de 10 Km.). En cualquier caso, en el rango de altitud habitable, la gran cantidad de factores que pueden influir sobre la temperatura del aire hace muy difícil disponer de hipótesis adecuadas. Debe tenerse presente, por tanto, que las expresiones que siguen permiten sólo obtener valores orientativos, y que las variaciones locales de temperatura pueden corregir dichos valores.

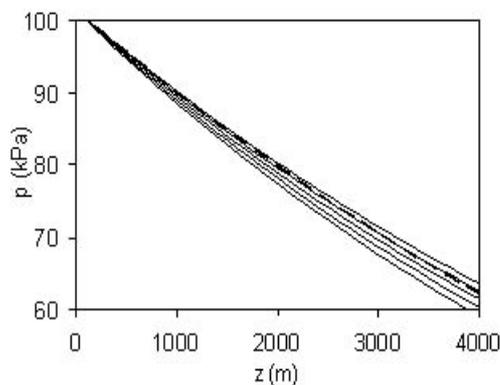


Figura 1.12. Efecto de la altitud sobre la presión atmosférica.

En esta figura se aprecia un efecto más notable al variar la presión con la altitud que al variar la temperatura, lo que se corresponde con los resultados experimentales.

En concreto, la fracción molar de oxígeno en el aire disminuye con la altitud, al ser el oxígeno (PM $O_2=32$ Kg. / kmol.) más pesado que el aire (PMA <29 Kg. / kmol.), tal y como se observa en la figura 1.17. Las líneas continuas representan la columna isoterma a -20, -10, 0, 10 y 20°C de abajo hacia arriba respectivamente. De otro lado, la fracción molar del nitrógeno aumenta ligeramente al ser algo más ligero que el aire. La

compensación de estos dos efectos hace que las variaciones del peso molecular del aire seco sean muy pequeñas.

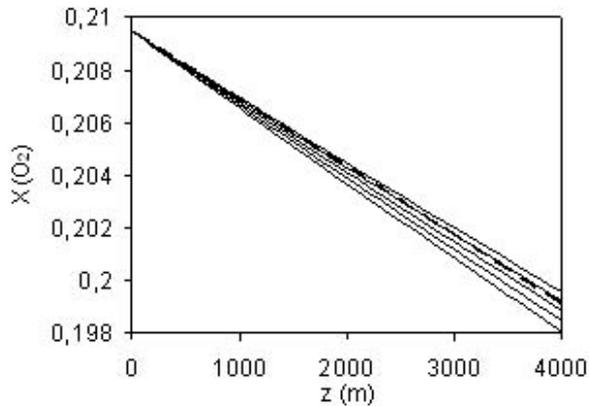


Figura 1.13. Efecto de la altitud sobre la fracción molar de oxígeno.

La concentración másica de oxígeno en el aire (C_{O_2}) disminuye con la altitud, tanto porque se reduce su fracción molar en el aire como porque cae la densidad de éste.

$$C_{O_2} = C_{O_2 0} e^{-\frac{gz}{R_{O_2} T}}$$

La figura muestra que a medida que la altitud aumenta la concentración de oxígeno disminuye, cualquiera que sea la temperatura ambiental. En la figura las líneas continuas representan la columna isoterma a -20, -10, 0, 10 y 20°C respectivamente de arriba hacia abajo. La reducción en la concentración de oxígeno es menos pronunciada al aplicar la hipótesis de columna triangular.

En cualquier caso, de los dos efectos que contribuyen a la disminución de la concentración de oxígeno con la altitud, el más importante es, con diferencia, el efecto de la presión.

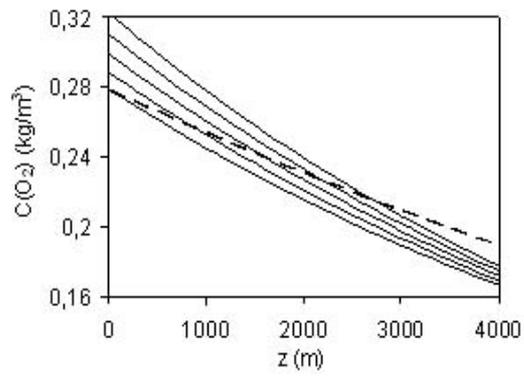


Figura 1.14. Efecto de la altitud sobre la concentración de oxígeno.

Los efectos mostrados sobre la presión, temperatura, fracción molar de oxígeno y su concentración, pueden a su vez tener distinta influencia sobre las prestaciones del motor, sobre el proceso de combustión y sobre las emisiones contaminantes.

II. TOXICIDAD DE LOS GASES DE ESCAPE

2.1. ANÁLISIS DEL PROCESO DE ESCAPE EN LOS MOTORES DIESEL

En los motores de cuatro tiempos las válvulas de escape se abren en un instante elegido de tal manera que en el primer período del barrido permite que los gases quemados salgan con una velocidad crítica relativamente grande, igual a 600 – 700 m/s. En el período siguiente los gases quemados son empujados por el émbolo que se desplaza hacia el p. m. s.

En todos los casos el instante de la apertura de los órganos de escape se elige experimentalmente. Los gases quemados salen del cilindro del motor a gran velocidad, produciendo un ruido estridente. Para disminuir este ruido se montan silenciadores en el tubo de escape. Al pasar por estos dispositivos los gases de escape se expanden, pierden velocidad y salen al medio ambiente sin hacer ruido.

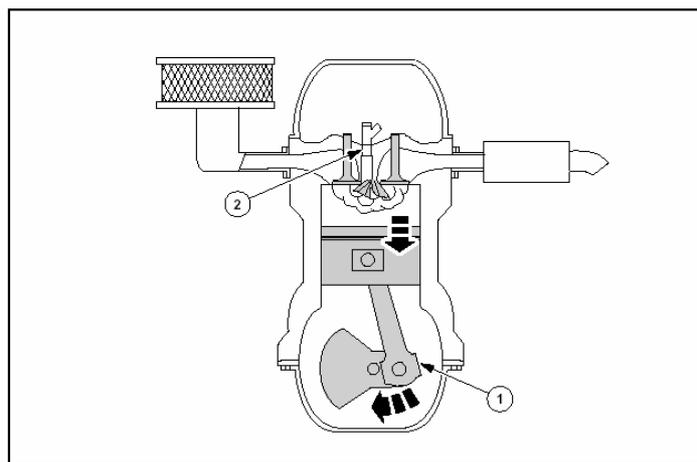
Los silenciadores aumentan algo la resistencia del sistema de escape, por lo que la presión en el cilindro se eleva en este período. En estas condiciones aumenta la cantidad de gases residuales que quedan en el cilindro y el coeficiente de llenado disminuye. Por esta razón, el silenciador debe tener una estructura que permita amortiguar debidamente el ruido sin que aumente la resistencia en el sistema de escape.

En el instante en que se abren los órganos de escape los gases quemados tienen una temperatura y una presión relativamente altas. Por consiguiente, con los gases de escape se pierde una cantidad considerable de calor. Una parte de la energía cinética de los gases de escape se puede aprovechar para alimentar el motor.

En el caso de los motores diesel el combustible es introducido a muy alta presión directamente dentro de la cámara de combustión. Hacia el final de la compresión y cuando el aire comprimido dentro de dicha cámara se ha calentado lo suficiente se inyecta el combustible, y este se inflama. En el motor diesel, a medida que el combustible va siendo inyectado se va quemando, generando el calor suficiente como para elevar aun más la temperatura dentro del cilindro y permitir que el motor entregue trabajo. Es decir que en el diesel la mezcla de aire y combustible se va produciendo en la medida que el segundo se quema.

El tiempo de escape es igual en los motores de gasolina y en los motores Diesel. La válvula de escape se abre cuando la rotación del cigüeñal empuja el pistón hacia arriba en el cilindro. Esto fuerza los gases quemados hacia afuera a través del puerto de escape. Cuando el pistón se acerca al punto muerto superior, la válvula de admisión se abre nuevamente y el ciclo se vuelve a repetir. La válvula de escape se cierra poco tiempo después de que el pistón inicia su movimiento hacia abajo.

El tiempo de escape no produce trabajo, pero gasta una cantidad de energía para empujar los gases de escape fuera del cilindro.



Tiempo de explosión del motor Diesel

Ref.	Descripción
1	Inyector de combustible
2	Cigüeñal

Figura 2.1. Tiempo de explosión del motor diesel

Los motores Diesel en automóviles, autobuses y camiones, producen gases de escapes resultantes de la combustión del combustible Diesel. Los gases de escape de los motores Diesel contienen sustancias químicas nocivas, incluyendo partículas tóxicas muy pequeñas y gases peligrosos.

2.1.1. EMISIONES DE LOS MOTORES DIESEL

Los motores a diesel han demostrado tener ventajas en economía de combustible y durabilidad, pero emiten en gran medida emisiones de Óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas de carbón en comparación con los motores a gasolina. Actualmente y gracias a las modificaciones de los componentes internos de los motores diesel se han reducido sustancialmente las emisiones gaseosas y de partículas.

La potencia de salida es controlada por la cantidad de combustible inyectado proporcional a la admisión de aire, los motores a diesel desarrollan una eficiencia superior debida a su alta relación de compresión.

Tanto el combustible diesel como los aceites lubricantes que se emplean en los motores a diesel actualmente cumplen requerimientos de calidad elevados e incorporan aditivos químicos que confieren a éstos propiedades superiores. El combustible diesel es una mezcla de diferentes moléculas de hidrocarburos que comprenden desde el C7 a C35, con un rango de ebullición que va de 177 °C a 343 °C, cabe señalar que la composición del combustible diesel y los lubricantes tiene efecto directo en el desempeño del motor, mantenimiento y emisiones de escape. Por ejemplo una reducción en el contenido de aromáticos, azufre y volatilidad tiene efecto directo en la reducción de las emisiones de escape.

Las emisiones de escape son influenciadas por la combustión completa o incompleta del combustible y el aceite lubricante, ambos pueden dar origen a mezclas en gases con partículas de carbón de bajo

peso molecular. Los compuestos orgánicos de alto peso molecular son absorbidos, en la tabla II.1 se listan las emisiones de la combustión del diesel y los productos de sus reacciones en la atmósfera.

Tabla II.1 Componentes emitidos por los motores diesel y sus transformaciones en la atmósfera

COMPONENTE EMITIDO	TRANSFORMACIÓN EN LA ATMÓSFERA
A.- EMISIONES EN FASE VAPOR	
DIÓXIDO DE CARBONO	
MONÓXIDO DE CARBONO	
ÓXIDOS DE NITRÓGENO	ÁCIDO NÍTRICO, OZONO
DIÓXIDO DE AZUFRE	ÁCIDO SULFÚRICO
HIDROCARBUROS	ALDEHÍDOS, NITRATOS ALQUILADOS,
ALCANOS ($\leq C_{18}$)	CETONAS.
ALCANOS ($\leq C_4$)	ALDEHÍDOS Y CETONAS
(P.E. 1,3 BUTABIENO)	
ALDEHÍDOS FORMALDEHÍDOS	MONÓXIDO DE CARBONO, RADICALES
ALDEHÍDOS DE ALTO PESO	PERÓXIDOS.
MOLECULAR (P.E. ACROLEINAS)	PEROXIACETIL NITRATOS (PAN)
COMPUESTO AROMÁTICO DE UN	HIDROXILATO Y DERIVADOS DE NITRO
ANILLO BENCÉNICO (BENZENO,	OXILATO
TOLUENO)	
PAH (\leq MENOR DE CUATRO	NITRO – PAHs (\leq MENOR DE CUATRO
ANILLOS)	ANILLOS)
(FLENANTRENO, FLUORANTRENO)	
NITRO – PAH (2 O 3 ANILLOS)	QUINOTAS Y DERIVADOS DE NITRO
(NITRONAFTALENOS)	OXILATOS

B.- PARTÍCULAS FASE GAS

CARBÓN ELEMENTAL

SULFATOS INORGÁNICOS

HIROCARBUROS ($\leq C_{14}$ a C_{35})

POSIBLEMENTE ALDEHÍDOS, CETONAS Y
ALQUILNITRATOS

PAH (≥ 4 ANILLOS)

NITRO – PAHs (≥ 4 ANILLOS)

(PIRENO, BENZO (a) PIRENO)

NITRO – PAH LACTANOS

NITRO – PAH (≥ 3 ANILLOS)

DERIVADOS DE NITRO HIDROXILATOS

(NITROPIRENOS)

2.2. COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

En primer término, debemos señalar que en el proceso de combustión de un motor intervienen dos elementos: El aire, que posee una composición de un 78% de nitrógeno y un 20% de oxígeno, y los hidrocarburos (petróleo), que son moléculas de carbono más hidrógeno ($H_n + C_n$).

Para que se produzca la reacción de una manera efectiva el combustible debe de pasar a estado gaseoso para mezclarse con el oxígeno. De esta manera, la reacción se generará de una forma más eficaz. Debido a que el proceso no es 100% eficaz, parte de los reactivos no se transforman en CO_2 y H_2O , sino que se formarán sustancias contaminantes que se emiten al exterior en forma de emisiones. Como consecuencia, parte de la energía química de los reactivos no se transformará en calor.

Para que se produzca una buena combustión se deben de cumplir varias premisas:

1. Transformar el combustible líquido a estado gaseoso. Cuanto mayor sea el peso molecular del compuesto hidrocarburo menos volátil será, y más complejo será el proceso de combustión.

2. Hacer que el aire y el combustible se mezclen y alimenten la zona de ignición y combustión. En la primera zona el aire y combustible están íntimamente mezclados en forma de gas, mientras que en la segunda zona es más heterogéneo ya que el combustible no está totalmente en forma de gas ni mezclado homogéneamente con el aire.

La ignición del combustible se produce cuando las gotas de este finamente formadas están a una temperatura suficiente dentro de la cámara de combustión. Sin embargo, si no se dan las condiciones adecuadas (moléculas muy grandes, poca cantidad de oxígeno y/o temperatura insuficiente) el combustible se quemará parcialmente, es decir, se oxidará formando partículas de carbonilla y otros tipos de partículas contaminantes.

2.2.1. INGRESO DEL COMBUSTIBLE A LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Cuando se inyecta combustible en la cámara de combustión de un motor diesel se forman zonas ricas y otras pobres en él. Tanto las zonas ricas como las pobres están involucradas en el proceso de combustión. En las zonas ricas en combustible se suelen generar mayor cantidad de CO, HC inquemados y carbonilla, mientras que en las zonas pobres se producen mayor cantidad de NOx. Sin embargo, en las zonas pobres en combustible, se suelen ir quemando el CO, HC y carbonilla formados en la zona rica antes de que se eliminen por la válvula de escape. La carbonilla no se elimina tan fácilmente debido a que es un sólido y no se oxida lo suficientemente rápido como para desaparecer antes de que abandone la cámara de reacción.

La entrada del aire en la cámara de combustión hace que se forme un torbellino, evaporando más fácilmente el combustible al arrastrar parte de él del spray y mezclándose con él, creando zonas ricas y pobres en combustible. La inflamación suele producirse muy cerca del punto estequiométrico, quemándose toda la mezcla disponible instantáneamente.

La mezcla que no se puede quemar por su pobreza tiende a oxidarse en parte pero no se quema.

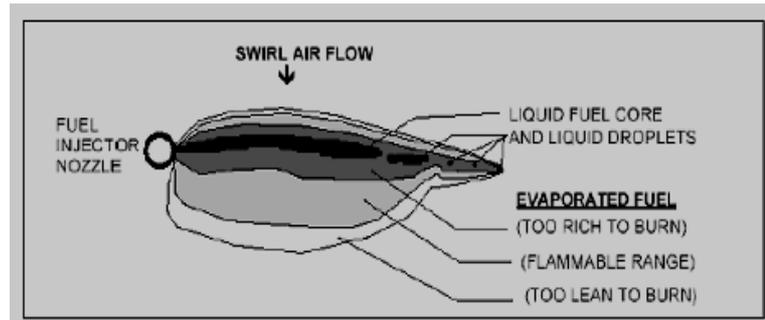


Figura 2.2. Zonas del Spray

La mezcla formada alrededor del spray de diesel produce dos zonas: la inflamable y la combustible. Cada una de ellas es importante desde el punto de vista de formación de contaminantes.

2.2.2. ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

El análisis se basa en la medida de presiones y temperaturas. Para ello se deben de hacer una serie de estimaciones:

1. Se considera la composición química de los gases inquemados igual a la de los quemados.
2. No existen fugas ni transferencias de calor hacia las paredes.
3. Se considera como una reacción entre gases ideales.

La reacción química de combustión es muy sensible a la temperatura. Esta dependencia se puede observar mediante la ecuación de Arrhenius:

$$R = A \cdot e^{(-E_a/RT)}$$

Donde:

R es la velocidad de la reacción,
Ea es la energía de activación,
A es el factor pre-exponencial,

Se puede ver que la velocidad de reacción es proporcional al exponencial de la temperatura. De esta manera un pequeño aumento en la temperatura produce un gran efecto en la velocidad de la reacción. Esto es muy importante a la hora de conocer el proceso de la combustión. Cuando el pistón se acerca al PMS el aire se va comprimiendo hasta que se produce el primer golpe de combustión.

2.2.3. CALIDAD DEL COMBUSTIBLE

Las especificaciones técnicas de desempeño para los motores diesel están basadas en un tipo de combustible específico (el combustible base). Las calidades normalmente disponibles para uso en motores diesel de media y alta velocidad se muestran en la tabla a continuación. Al considerar el rendimiento del motor, siempre es necesario conocer las propiedades del combustible utilizado y cómo se compara con el combustible de base indicado en las especificaciones de desempeño.

Tabla II.2 Calidad del Combustible

GRADO DEL COMBUSTIBLE	GRAVEDAD API	PODER CALORÍFICO (BTU/lb)
1 – D	40 – 44	18,510 – 19,860
2 – D	33 – 37	18,335 – 19,650

2.3. COEFICIENTE DE LOS GASES RESIDUALES

En el proceso de escape no se logra desalojar por completo del cilindro los productos de combustión, ocupando éstos cierto volumen a presión p_r y temperatura T_r , respectivamente. En el proceso de admisión los gases residuales

se expanden y, mezclándose con la carga fresca que ingresa, hacen disminuir el llenado del cilindro. La cantidad de gases residuales M_r depende del procedimiento empleado para limpiar el cilindro, así como de la posibilidad de barrido del cilindro por la carga fresca.

La cantidad de gases residuales se caracteriza por una magnitud relativa denominada coeficiente de gases residuales

$$v_r = M_r / M_1$$

En los motores de cuatro tiempos, que tienen traslapo de válvulas (no mayor de 30 - 40°), el cual excluye la posibilidad de barrido, puede considerarse que al final de la carrera de escape los gases residuales ocupan el volumen de la cámara de combustión $V_c = V_h / (\varepsilon - 1)$ Y, por lo tanto, su cantidad

$$M_r = \frac{p_r V_c}{R_v T_r}$$

Donde p_r Y T_r son, respectivamente, la presión y temperatura dentro del cilindro al final del escape; R_v la constante universal de los gases.

La magnitud p_r queda definida por la presión del medio ambiente al cual se expulsan los gases, es decir, por la presión p_o en caso de escape a la atmósfera o p cuando en el escape se instala un silenciador o un colector, habiendo sobrealimentación por turbocompresor.

La temperatura T_r depende de la composición de la mezcla, del grado de expansión y del intercambio de calor en la expansión y en el escape. En los motores Diesel, donde la regulación de la carga se efectúa variando la composición de la mezcla, la temperatura visiblemente decrece al disminuir la carga. La magnitud de T_r en los motores Diesel es considerablemente menor (en 200 - 300 K), comparada con la de los motores a gasolina, debido a las relaciones

de compresión y respectivamente de expansión más altas y a las temperaturas más bajas en este último proceso.

El volumen V_c depende unívocamente de la relación de compresión e , disminuyendo cuando ésta aumenta. Por lo tanto, manteniendo todas las demás condiciones, en los motores de cuatro tiempos, el aumento de ε va acompañado siempre de la disminución de M_r .

El número de moles de la carga fresca M_1 se caracteriza por las condiciones de llenado y regulación de la carga. Al disminuir la carga en los motores a gasolina mediante la reducción de los gases la magnitud M decrece, mientras que en caso de regulación cualitativa de la potencia que se emplea en los motores Diesel, dicha magnitud aumenta en cierta medida. Al haber sobrealimentación M_1 aumenta en ambos casos.

De esta manera, con respecto al coeficiente de gases residuales γ_r se pueden hacer las siguientes conclusiones generalizadas

En los motores a gasolina el coeficiente γ_r es mayor, que en los motores Diesel, debido a menores ε . En los motores Diesel sin sobrealimentación, $\gamma_r = 0,03 \dots 0,06$.

2.4 CONTAMINACIÓN POR LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DIESEL.

La combustión en los motores de CI es turbulenta o de difusión en el motor Diesel. La velocidad de llama no es fácil de predecir: en una llama premezclada, laminar, puede ser del orden de los 30-40 m/s, pero en una llama premezclada turbulenta puede ser 10 o hasta 50 veces más alta, En una llama turbulenta de difusión hay otros factores controlantes tales como evaporación, mezcla, transmisión de calor, etc.

A esto se debe añadir el efecto de la expansión de los gases quemados, que altera fuertemente la velocidad de llama, y su temperatura (Figura 2.3)

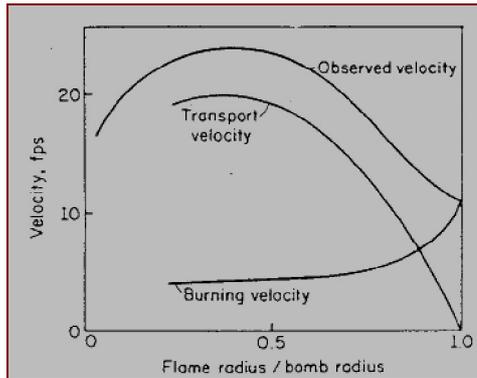


Figura 2.3. Velocidad de llama, química y de transporte

La temperatura de llama afecta a la composición de los productos de combustión, y la velocidad de quemado y posterior enfriamiento determinan la composición final de los gases de escape.

También se deben considerar los inquemados producidos por apagado cerca de la paredes, la absorción de combustible por el aceite, el lavado por mala evaporación o penetración, etc.

La riqueza de la mezcla también es determinante de los contaminantes producidos, tanto en el ciclo Otto como en el Diesel, como muestran la Figura 2.4.

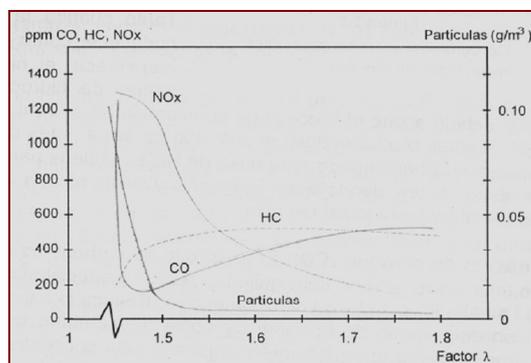


Figura 2.4. Contaminantes del Ciclo Diesel versus riqueza

Los principales contaminantes son el CO, los hidrocarburos no quemados y los óxidos de Nitrógeno.

De éstos, aproximadamente 2/3, 2/3 y 1/3 de la contaminación total del ambiente se deben al motor de CI en uso urbano (autos).

Los orígenes de los contaminantes son:

- **Inquemados.-** apagado en las paredes y hendidias, apagado al soltar el acelerador (evaporación instantánea del mojado del múltiple al producirse vacío, que causa mezcla momentáneamente muy rica), apagado en la marcha en vacío (mezcla muy pobre)
- **CO.-** mezcla muy rica, mala puesta a punto del motor
- **NOx.-:** altas temperaturas de combustión, mezcla ligeramente pobre, mal diseño.

2.5 COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE

Las condiciones en que se quema el combustible en el cilindro del Diesel contribuyen a la formación de unos compuestos complejos; una parte considerable de éstos son sustancias tóxicas y algunos pertenecen a la categoría de sustancias cancerígenas (agentes de enfermedades cancerosas). Los gases de escape de los motores de combustión interna diesel contienen una cantidad considerable de componentes (tabla II.3).

Tabla II.3. Componentes principales de los gases de escape

COMPONENTES	COMPOSICIÓN DE LOS GASES (EN %) SEGÚN EL VOLUMEN	INFLUENCIA DEL COMPONENTE SOBRE EL ORGANISMO HUMANO
NITRÓGENO	76 – 78	NO ES TÓXICO
OXIGENO	2 – 18	NO ES TÓXICO
VAPORES DE AGUA	0,5 – 4	NO ES TÓXICO
ANHÍDRIDO CARBÓNICO	1 – 10	NO ES TÓXICO
MONÓXIDO CARBÓNICO	0,01 – 0,5	TÓXICO
ÓXIDOS DE NITRÓGENO	0,002 – 0,5	TÓXICO
HIDROCARBUROS	0,009 – 0,5	TÓXICO
ALDEHÍDOS	0,001 – 0,009	TÓXICO
HOLLÍN	0,01 – 1,1 g/m ³	TÓXICO
BENZOPIRENO	HASTA 10 g/m ³	CANCERÍGENO

El exceso considerable de oxígeno en el motor Diesel conduce a una reducción, en los gases de escape, del contenido relativo de monóxido carbónico, sin embargo, a causa de la imperfección del proceso, éste, pese a todo, se forma y alcanza los 0,5 del volumen del gas. En los gases de escape del motor Diesel inevitablemente se encuentran los aldehídos: formaldehído (HCHO), acroleína (CH₂-CH-CHO), acetaldehído (CH₃CHO) y otros, puesto que su formación contribuye a la preparación de la mezcla para la inflamación.

La presencia de hollín en los gases de escape es resultado de la postcombustión de gotas aisladas, principalmente grandes, de combustible en el proceso de expansión de los gases en el cilindro y durante el escape, es decir, a presión y temperatura reducidas. El hollín representa una suspensión de partículas diminutas de carbono en los productos de combustión, atribuye a los gases de escape una coloración gris, gris oscura e incluso negra, lo que en grado considerable caracteriza la imperfección en organización del proceso de funcionamiento. En la mayoría de los casos esto es resultado de la imperfección en la formación de la mezcla, pero también puede ser resultado del relleno incompleto de los cilindros que condiciona un coeficiente de exceso de aire insuficiente para los motores Diesel.

Los gases de escape de los motores diesel, aparte de las sustancias nocivas que ya se conocen del motor Otto (a saber, CO, HC y NO_x), contienen adicionalmente emisiones sólidas (el llamado hollín). Si se comparan las emisiones de escape del motor Otto con las del motor diesel convencional, se comprueba que el motor diesel sin depuración de gases de escape alcanza valores más bajos de CO y HC, mientras que las concentraciones de NO_x son similares en los dos tipos de motores. (En los motores de gasolina, con la acumulación de kilómetros aumentan los NO_x y en los diesel disminuyen).

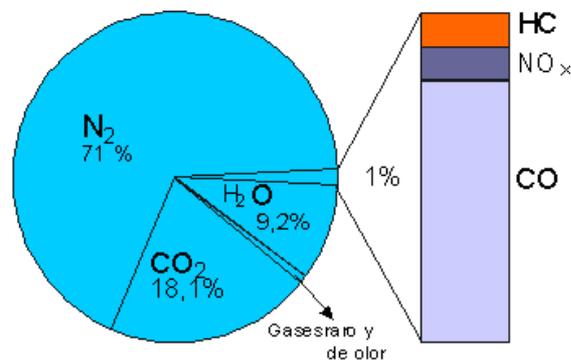


Figura 2.5. Composición de los gases de escape

Si se analizan las emisiones de partículas, las concentraciones más altas corresponden al motor diesel. Las partículas sólidas, denominadas comúnmente hollín, constan de un núcleo de carbono puro, al que se hallan adheridos los siguientes componentes:

- Hidrocarburos (HC).
- Agua (H₂O).
- Sulfato (SO₄).
- Azufre y óxidos metálicos varios.

El núcleo de carbono puro se considera una sustancia inofensiva para la salud, pero algunos compuestos de hidrocarburos se consideran nocivos y otros producen un olor desagradable.

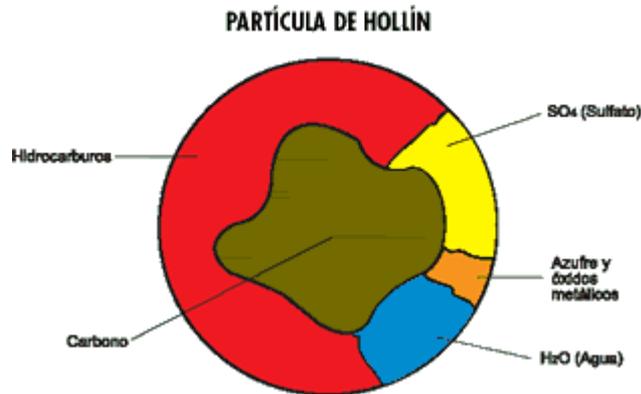


Figura 2.6. Partícula de Hollín

Los motores Diesel transforman la energía química contenida en el combustible en fuerza mecánica. El combustible es inyectado bajo presión al cilindro del motor, donde se mezcla con aire y produce la combustión. Los gases del escape que descarga el motor contienen varios componentes que son nocivos para la salud humana y el medio ambiente. La tabla II.4 muestra los rangos típicos de materiales tóxicos, presentes en el humo del escape. Los valores menores pueden encontrarse en motores nuevos y limpios, y los valores altos en equipos antiguos.

Tabla II.4. Rangos de materiales tóxicos

CO	HC	DPM	NOx	SO₂
vppm	vppm	g/m ³	vppm	vppm
5-1,500	20-400	0.1-0.25	50-2,500	10-150

2.5.1. LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NOx)

Los óxidos de nitrógeno están compuestos por el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), el cual corresponde entre un 70 %-90% del total de los NOx provenientes de los motores diesel. A diferencia de los otros contaminantes expuestos anteriormente, el NOx es un efecto colateral de la combustión, no un paso incompleto en ella. Combustibles hidrocarburos con oxígeno energiza el motor; el nitrógeno atmosférico es atrapado en los procesos de reacción. La formación de NO es bien

comprendida, un exceso de aire en el cilindro puede llevar los niveles de NOx sobre las concentraciones de equilibrio.

La formación de NO dependen en pleno de la cantidad de oxígeno y de las altas temperaturas. La parte inicial de la combustión es muy importante para la formación de NOx, al menos todo el NOx se forma en los primeros 20° del giro del cigüeñal después del inicio de la combustión. Técnicas de control de NOx se enfocan en este momento de la combustión. Sin embargo, la mayoría de estas técnicas reducen la temperatura de combustión, y penalizan en las emisiones de HC, material particulado y consumo de combustible.

La mayoría de los factores que afectan la tasa inicial de calor también afectarían la tasa de formación de NOx en la misma dirección. La cantidad de combustible quemado en una fase de premezclado puede ser reducida por una suavización de la tasa (una baja en la tasa de inyección tempranamente en el período de inyección) y una inyección piloto (una pequeña inyección separada para iniciar la combustión con un mínimo de combustible). Acortando el período de retraso se puede obtener una reducción de la cantidad de combustible quemado en el período de requemado: un mayor índice de cetano produce menores emisiones de NOx. Las temperaturas del aire altamente comprimido (las temperaturas elevadas de entrada de aire, altas razones de compresión, o turbo cargadores) puede reducir las emisiones de NOx para bajas cargas, pero para altas cargas los picos de temperatura de combustión mayores incrementan las emisiones de NOx. Algunos factores que promueven la mezcla aire-combustible en los períodos de retraso también incrementan la razón de liberación de calor, y, por lo tanto, las emisiones de NOx. El tiempo de ignición puede ser fácilmente retardado para reducir no solo los picos de temperatura en el gas sino que también los tiempos en los que se mantiene esta temperatura, pero el consumo de combustible se ve penalizado en forma severa.

El Aftercooling también reduce la temperatura del aire, con un trade-off de emisiones de NO_x/consumo de combustible superior y una mayor potencia del motor. Diluidores como el EGR o la inyección de agua reducen el pico de la temperatura en ciertos lugares, y son los métodos más efectivos para el control de las emisiones de NO_x dentro del cilindro. Sin embargo, estas estrategias son aplicables a un número reducido de motores con especificaciones bien especiales (motores de automóviles medianos o pequeños para EGR, motores estacionarios grandes para inyección de agua). Todos estos factores son parámetros de diseño u operacionales que cambian los trade-off entre NO_x/material particulado y NO_x/consumo de combustible.

2.5.2. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

Se genera por el azufre presente en el combustible, y su concentración depende de la cantidad de azufre presente. Combustibles con bajo contenido de azufre (menor a 0,05 %), se están introduciendo para motores diesel en Estados Unidos y Canadá. El dióxido de azufre es un gas tóxico incoloro, con la característica de emitir un olor irritante.

La oxidación del (SO₂) produce trióxido de azufre, precursor del ácido sulfúrico, responsable de las partículas de sulfato en las emisiones diesel. Los óxidos de azufre tienen un profundo impacto en el medio ambiente es la mayor causa de la lluvia ácida.

2.5.3. DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

Existe naturalmente en la atmósfera y es un producto normal de la combustión. Idealmente, la combustión de un combustible hidrocarburo debe producir solo dióxido de carbono y agua. La proporción relativa de estos dos depende de la razón carbono-hidrógeno en el combustible,

alrededor de 1:1,75 para diesel común. Sin embargo, las emisiones de CO₂ provenientes del motor pueden reducirse mediante la reducción del contenido de carbono por unidad de energía, o por mejoramiento de la eficiencia del combustible en el motor. La alta eficiencia del motor diesel le da una ventaja ambiental sobre los combustibles fósiles.

2.5.4. MATERIAL PARTICULADO DEL DIESEL (MPD)

Las partículas, es un complejo agregado de materiales sólidos y líquidos. Su origen son partículas de carbono, generadas en el cilindro del motor durante la combustión. Las principales partículas de carbono de grandes moléculas, combinadas con otras, ambas orgánicas e inorgánicas, son componentes del escape del Diesel.

Generalmente, el MPD está dividido en tres partes básicas:

- **Sólidos** - partículas de carbón seco, conocido como hollín.
- **FOS** - hidrocarburos pesados absorbidos y condensados en partículas de carbón, llamados fracción orgánica soluble.
- **SO₄** - radical sulfato, ácido sulfúrico hidratado.

La composición del material particulado depende del motor, su carga y la velocidad. Las partículas "húmedas", pueden contener hasta un 60% de hidrocarburos (FOS), mientras que las partículas "secas", consisten mayormente en carbón seco. La cantidad de sulfatos dependen directamente de la cantidad de azufre presente en el combustible. Las partículas del Diesel son muy finas. La principal partícula de carbono (núcleo) tiene un diámetro entre 0,01 - 0,08 micras, mientras que el diámetro las partículas aglomeradas se encuentra en el rango de 0,08 - 1 micras. Así, el material particulado del Diesel es totalmente respirable y tienen un impacto significativo en la salud humana. Se ha clasificado por varios gobiernos como "cancerígeno o probablemente cancerígeno para el

hombre". Es sabido que el riesgo de enfermedades cardíacas y respiratorias aumenta.

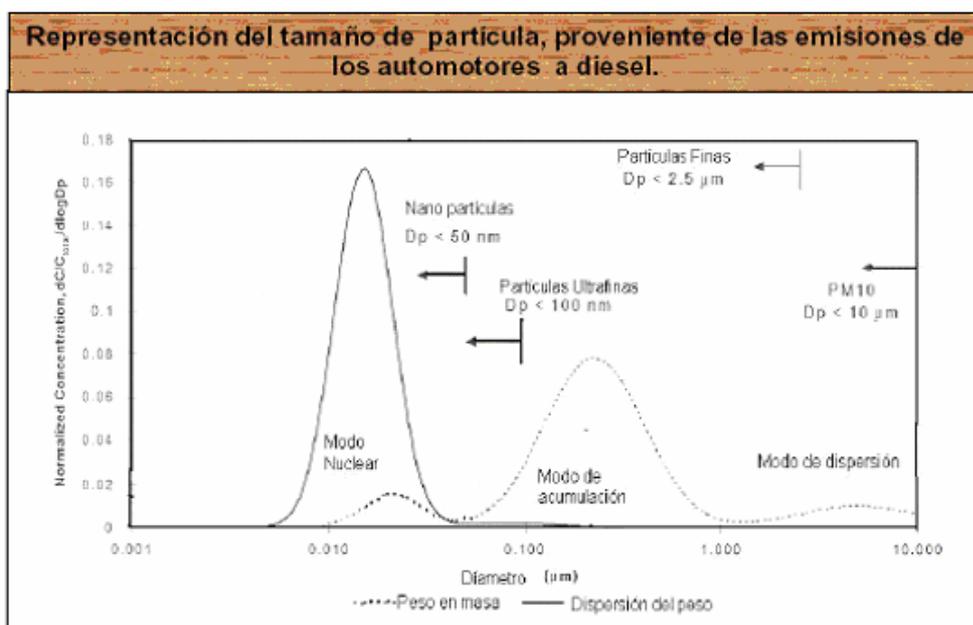


Figura 2.7. Tamaño de las partículas de las emisiones de gases

2.5.5. HIDROCARBUROS NO QUEMADOS

Las emisiones de hidrocarburos no quemados consisten en combustible no quemado o quemado en forma parcial. El término hidrocarburo significa compuesto orgánico en estado gaseoso; hidrocarburos sólidos son parte del material particulado. El mecanismo que lidera las emisiones de hidrocarburos desde el motor diesel es completamente diferente al que prepondera en los motores a gasolina. En este último, una mezcla casi homogénea de aire combustible es comprimida, y la llama pasa a través de la cámara de combustión. Las emisiones de hidrocarburos aparecen en el motor a gasolina cuando la mezcla aire-combustible se esconde en lugares inaccesibles a la llama.

El lugar más significativo es el volumen contenido entre el pistón y la pared del cilindro, sobre el anillo del pistón. En un motor diesel solo el aire es comprimido dentro de este volumen. En efecto, esto reduce el aire

disponible para la combustión, pero esto no permite que una importante cantidad de combustible escape de la combustión. En el motor diesel, con una combustión no homogénea, las emisiones de HC resultan de problemas de la mezcla de aire y combustible, y no se ven afectadas por la razón aire-combustible. Existen dos mecanismos primarios por los cuales el combustible escapa de la combustión principal en un motor diesel; sobre-mezcla, regiones de extra-pobreza

2.6 TOXICIDAD DE LOS COMPONENTES DE LOS GASES DE ESCAPE DE MOTORES DIESEL

La toxicidad de los componentes de los gases de escape de los motores Diesel depende de diversos factores entre los cuales, en primer lugar, conviene indicar el tipo de cámara de combustión o el procedimiento de formación de la mezcla. Los resultados de las investigaciones de la composición de los gases de escape de los motores Diesel para automóviles y tractores, llevadas a cabo en una serie de países, mostraron que con cámaras de combustión separadas (antecámaras, cámaras de turbulencia) la expulsión de componentes tóxicos, como regla, es 2 – 2,5 veces menor que en el caso de la inyección directa del combustible.

Diesel con cámaras de combustión separadas son menos tóxicos que los componentes de los gases de escape de los motores Diesel con inyección directa (tabla II.5).

Tabla II.5. Estimación promedio de la toxicidad (g/CV) (g/KWh) de motores Diesel con cámaras separadas y con inyección directa del combustible

COMPONENTES TÓXICOS	MOTORES DIESEL	
	Con cámara de turbulencia	Con inyección directa del combustible
Óxidos de Nitrógeno	8 – 12 (10,9 – 16,3)	20 – 25 (27,2 – 34)
Hollín	0,5 – 1,5 (0,7 – 2)	2 – 2,5 (2,7 – 3,4)
Monóxido Carbónico	0,3 – 1,5 (0,4 – 2,0)	2 – 5 (2,7 – 6,8)
Hidrocarburos	0,2 – 0,3 (0,3 – 0,4)	0,3 – 0,5 (0,4 – 0,7)

Debe considerarse que para los motores Diesel de ambos tipos los componentes nocivos principales, que no se someten a neutralización, de los gases de escape son los óxidos de nitrógeno y el hollín. Para reducir la toxicidad de los óxidos de nitrógeno y del hollín se utilizan cámaras de combustión separadas. Siendo las demás condiciones iguales, el proceso de quema del combustible en los motores Diesel con cámaras separadas se desarrolla de manera más favorable que en los motores Diesel con inyección directa, desde el punto de vista de la formación menor de óxidos de nitrógeno, que es el componente tóxico principal.

La presión y la temperatura de combustión, en el caso de cámaras separadas, también son más bajas que en el caso de la inyección directa. Puesto que los óxidos de nitrógeno se forman en primer lugar, en presencia de oxígeno libre y a temperaturas altas, es natural que, al utilizar cámaras de combustión separadas, las condiciones físico-químicas contribuyen, en grado menor, a su formación.

2.6.1. INFLUENCIA DEL CETANO SOBRE LAS EMISIONES DE DESCARGA

El cetano influye sobre las emisiones de NOx y el consumo de combustible es producto del funcionamiento de la carga del motor. El efecto sobre las emisiones de NOx en especial para pequeñas cargas, se obtiene una reducción de 9% sobre las emisiones de NOx. Además al aumentar el número de cetano existe una reducción sobre las emisiones de HC en un 30-40%.

En el caso de vehículos livianos, al aumentar el número de cetano disminuyen las emisiones de HC y CO. Por ejemplo si se aumenta el número de cetano desde 50 a 58, las emisiones de HC y CO disminuyen en un 26%.

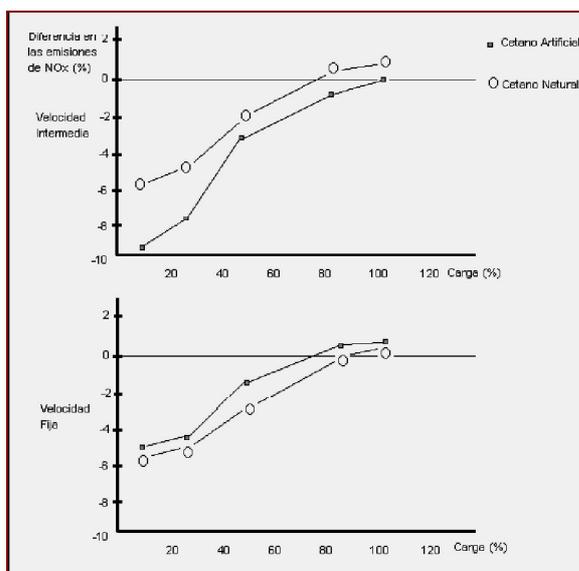


Figura 2.8. Efectos del Cetano sobre las emisiones de NOX

Las reducciones de sulfuro podrían ser más significativas, como se muestra en la Figura 2.8 para vehículos pesados. Las reducciones de sulfuro en el combustible proveerán a las reducciones de MP para todo tipo de motores.

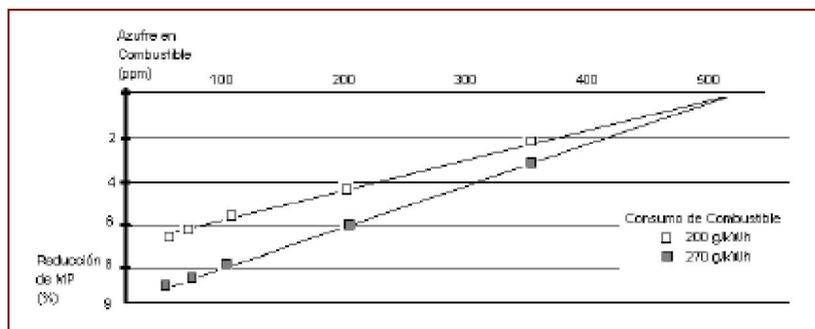


Figura 2.9. Efecto del Azufre en el Combustible Diesel sobre Emisiones de MP

2.6.2. CONTRIBUCIÓN DEL AZUFRE DEL COMBUSTIBLE SOBRE EL MATERIAL PARTICULADO

El sulfuro del combustible se oxida durante la combustión para formar SO_2 , que es el compuesto primario del sulfuro emitido por el motor. Parte del SO_2 es oxidado para formar sulfato (SO_4). El sulfato asociado con agua forman un núcleo de carbón de particulado. Este aumento sobre la masa del MP hace que el sulfuro tenga una influencia significativa sobre el MP.

La conversión desde sulfuro a sulfato es de alrededor del 1%. Sin embargo, después del uso de un tratamiento que contiene oxidación dramática de un catalítico, aumenta el valor de conversión por sobre el 100% dependiendo de la eficiencia del catalizador. Por lo tanto, el sistema de oxidación con catalizador, tiene una larga proporción del motor fuera el SO_2 que se oxidará a SO_4 , aumentando al cantidad de MP emitido por el vehículo.

2.7. MÉTODOS PARA NEUTRALIZAR LOS GASES DE ESCAPE

Para la neutralización de los gases de escape desde hace años se habla de catalizadores de tres vías, de catalizadores de oxidación, de sondas Lambda o de válvulas ERG.

El sensor que proporciona al sistema la capacidad de mantener la estequiometría es el sensor o sonda "Lambda". Se coloca atornillada en el colector de escape, suministra a la computadora información sobre el contenido de oxígeno de los gases residuales que se escapan de los cilindros. Esencialmente es una pila seca, ya que produce voltaje del potencial eléctrico entre dos sustancias, en este caso, el aire ambiental y el escape; cuanto más oxígeno hay en el escape (lo cual corresponde a una condición de mezcla pobre) menor será el potencial y el voltaje producido, pero cuando hay menos oxígeno (como en una mezcla rica) mayor será el potencial y el voltaje creado.

El convertidor catalítico de oxidación de doble vía puede limpiar una gran cantidad de HC y CO después de dejar los cilindros; un contaminante más difícil de eliminar son los NOx (óxidos de nitrógeno, un ingrediente del esmog fotoquímico). Si bien la EGR realiza una tarea razonablemente buena en mantener baja la formación de NOx reduciendo las temperaturas máximas de combustión, no puede hacer lo suficiente para satisfacer los requisitos de algunos países.

El convertidor catalítico de tres vías tiene una sección de oxidación que utiliza platino y paladio, más una sección de reducción que utiliza rodio para reducir los NOx a nitrógeno y oxígeno inocuos, sin embargo esta reacción de reducción sólo se puede mantener si hay una relación estequiométrica de aire y combustible.

2.7.1. CONVERTIDORES CATALÍTICOS

Los avances tecnológicos, han permitido una reducción de las emisiones de los automotores del orden del 95 % de Monóxido de Carbono e Hidrocarburos libres y 75 % de Óxidos de Nitrógeno.

Esto representa un claro ejemplo de la evolución conjunta de las industrias automotrices y refinadoras, el primero y quizás el más

significativo: la eliminación de plomo de las naftas y por lo tanto la posibilidad de equipar a los vehículos nuevos con Convertidores Catalíticos para el tratamiento de los gases de emisión con la consecuente reducción en la toxicidad de los mismos. Este diseño se completa con el agregado de la Sonda Lambda, que permite controlar y regular permanentemente la cantidad ideal de aire para la combustión.

El término “Convertidor Catalítico” designa genéricamente a un reactor instalado luego del múltiple de escape. Tiene una carcasa de acero inoxidable que contiene en su interior al “catalizador”. Sustancias químicamente activas, soportadas por una colmena cerámica recubierta por una capa amortiguadora que la protege de golpes.

Esta colmena está formada por millares de minúsculos canales (celdas) por donde pasan los gases de escape. Las paredes de estos canales generan una superficie de contacto equivalente a tres canchas de fútbol. La formulación incluye una serie de sustancias activas como óxidos de aluminio, metales nobles (catalíticamente activos): Platino, Rodio, Paladio, y promotores o retardadores específicos, que aumentan o retardan la acción catalítica de los anteriores, sobre determinadas reacciones.

Recordemos que en los gases de escape tenemos como productos contaminantes, principalmente a tres clases de compuestos: Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno e Hidrocarburos sin quemar. El mecanismo de acción del Convertidor Catalítico de tres vías, llamado así porque actúa eliminando principalmente estos tres tipos de contaminantes en el mismo compartimento, mediante reacciones de oxidación y reducción, transforma a los mismos en compuestos no tóxicos: Nitrógeno y Agua y Dióxido de Carbono.

Los catalizadores de tres vías imponen otra condición para que su funcionamiento sea óptimo: la catálisis sólo se produce con temperaturas

superiores a los 250 °C, motivo por el cual el lugar físico que ocupará el convertidor será próximo al múltiple de escape.

Los diseños de motores, en lo que hace a la ubicación del catalizador y/o calentamiento auxiliar del mismo, han ido evolucionando de manera de garantizar que dicha temperatura sea alcanzada en períodos de sesenta a noventa segundos.

Las reacciones son la que tienen lugar en los catalizadores de oxidación, y mediante ellas se obtienen grandes reducciones de HC y CO. Si el catalizador es de tres vías también se eliminan los óxidos de nitrógeno.

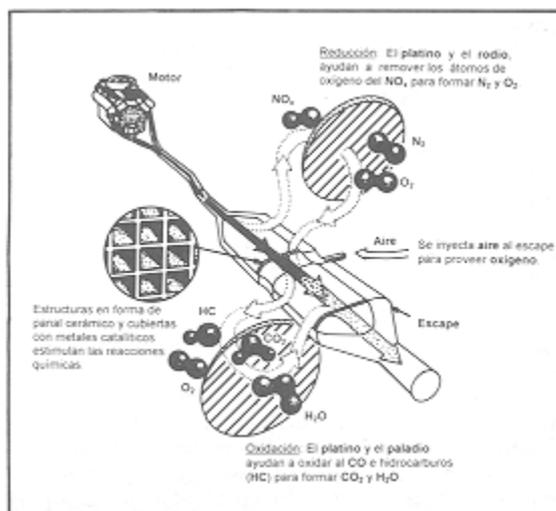


Figura 2.10. El convertidor catalítico trimodal

2.7.2. FILTRO DE PARTÍCULAS

Un filtro de partículas remueve el material particulado desde los gases de escape mediante filtración física. El tipo más común corresponde a un monolito de cerámica (corderita o carburo de sílice) en forma de panel de abeja. La estructura es tal que los conductos poseen alternadamente una de las entradas bloqueadas, lo que hace que los gases de escape deban fluir a través de las paredes entre los canales, depositándose así el material particulado en estas.

Se dispone también de otros tipos de filtros, que consisten en estructuras de metal sinterizado lo forjado como medio de filtración. La eficiencia de filtración en los filtros de material particulado es mayor al 99% para material sólido. Cuando el material particulado tiene una porción sólida, la eficiencia es bajo el 90%.

Una variante de estos sistemas es la filtración parcial. Estos sistemas pueden ser diseñados para atrapar, por ejemplo, un 60% del material particulado. Las ventajas son la menor presión de trabajo y un menor riesgo de bloqueo. Todos los sistemas de filtros poseen conceptos de regeneración.

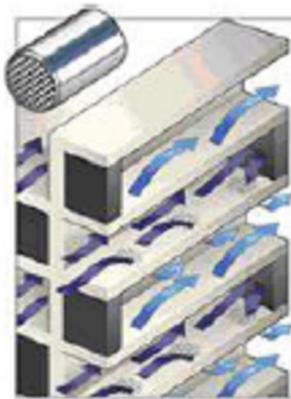


Figura 2.11. Flujo a través de las paredes del filtro.

2.7.3. SISTEMA CRT

El sistema CRT es el sistema DPF más comúnmente usado en el mundo. Este comprende un catalizador de oxidación seguido por el filtro de partículas.

La catálisis de oxidación remueve el CO y el HC y oxida una parte del NO presente en los gases de escape en NO₂. Este NO₂ reacciona con el MP atrapado en el filtro.

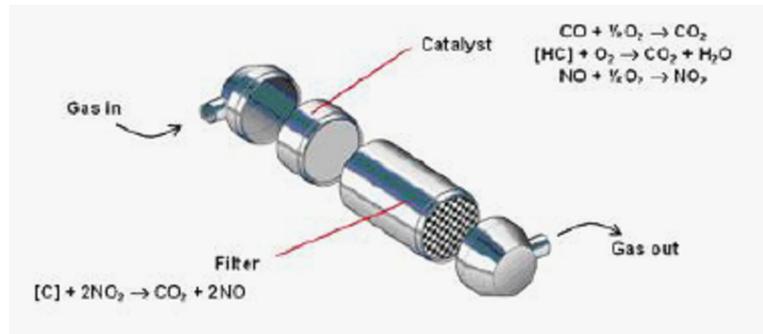


Figura 2.12. Principio de funcionamiento CRT.

2.7.4. SISTEMA CCRT

El sistema CCRT es un sistema CRT, pero se aplica un principio catalizador al filtro de partículas. La catálisis de oxidación remueve el CO y el HC y oxida parte del NO en los gases de escape en NO₂. Este NO₂ reacciona con el MP atrapado en el filtro, produciendo NO y CO₂. Parte de este NO es reoxidado en NO₂ en el filtro, el cual reacciona con más PM atrapado en este. Esto permite que el sistema regenere en condiciones de baja temperatura de gases de escape o bajas razones de NO_x: PM en los gases de escape.

El funcionamiento en la reducción de emisiones del sistema CCRT es el mismo o un poco mejor que el del sistema CRT. Su ventaja radica en que posee un mayor rango de condiciones de operación.

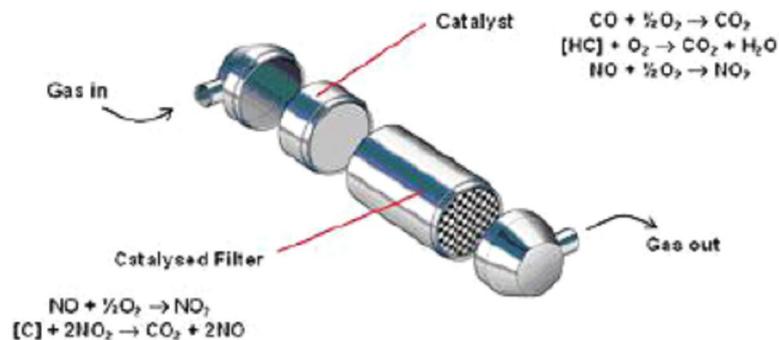


Figura 2.13. Principio de funcionamiento para el sistema CCRT.

III. SOBREALIMENTACIÓN POR TURBOCOMPRESOR Y ENFRIAMIENTO DEL AIRE DE ADMISIÓN MEDIANTE INTERCOOLER EN EL MOTOR ISUZU 4BD1T

3.1 EL TURBOCOMPRESOR

El Turbocompresor tiene la particularidad de aprovechar la fuerza con la que salen los gases de escape para impulsar una turbina colocada en la salida del colector de escape, dicha turbina se une mediante un eje a un compresor. El compresor está colocado en la entrada del colector de admisión, con el movimiento giratorio que le transmite la turbina a través del eje común, el compresor eleva la presión del aire que entra a través del filtro y consigue que mejore la alimentación del motor. El turbo impulsado por los gases de escape alcanza velocidades por encima de las 100.000 rpm, por tanto, hay que tener muy en cuenta el sistema de engrase de los cojinetes donde apoya el eje común de los rodets de la turbina y el compresor. También hay que saber que las temperaturas a las que se va a estar sometido el turbo en su contacto con los gases de escape van a ser muy elevadas (alrededor de 750 °C).



Figura 3.1. Turbocompresor

3.1.1. CICLOS DE FUNCIONAMIENTO DEL TURBOCOMPRESOR

Funcionamiento a ralentí y carga parcial inferior: En estas condiciones el rodete de la turbina de los gases de escape es impulsada por medio de la baja energía de los gases de escape, y el aire fresco aspirado por los cilindros no será precomprimido por la turbina del compresor, simple aspiración del motor.

Funcionamiento a carga parcial media: Cuando la presión en el colector de aspiración (entre el turbo y los cilindros) se acerca la atmosférica, se impulsa la rueda de la turbina a un régimen de revoluciones mas elevado y el aire fresco aspirado por el rodete del compresor es precomprimido y conducido hacia los cilindros bajo presión atmosférica o ligeramente superior, actuando ya el turbo en su función de sobrealimentación del motor.

Funcionamiento a carga parcial superior y plena carga: En esta fase continua aumentando la energía de los gases de escape sobre la turbina del turbo y se alcanzara el valor máximo de presión en el colector de admisión que debe ser limitada por un sistema de control (válvula de descarga). En esta fase el aire fresco aspirado por el rodete del compresor es comprimido a la máxima presión que no debe sobrepasar los 0,9 bar en los turbos normales y 1,2 en los turbos de geometría variable.

3.1.2. CONSTITUCIÓN DE UN TURBOCOMPRESOR

Los elementos principales que forman un turbo son el eje común (3) que tiene en sus extremos los rodetes de la turbina (2) y el compresor (1) este conjunto gira sobre los cojinetes de apoyo, los cuales han de trabajar en condiciones extremas y que dependen necesariamente de un circuito de engrase que los lubrica

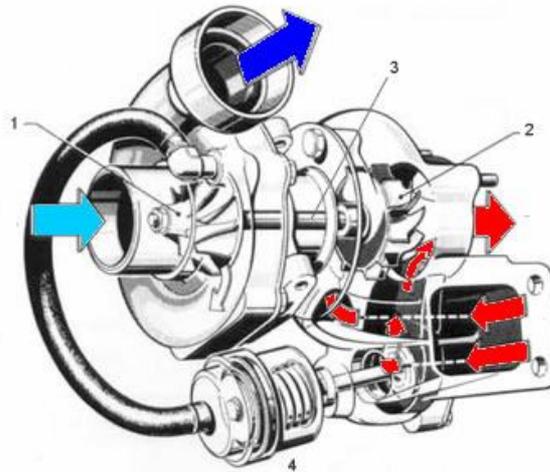


Figura 3.2. Elementos del turbocompresor

Por otra parte el turbo sufre una constante aceleración a medida que el motor sube de revoluciones y como no hay limite alguno en el giro de la turbina empujada por los gases de escape, la presión que alcanza el aire en el colector de admisión sometido a la acción del compresor puede ser tal que sea mas un inconveniente que una ventaja a la hora de sobrealimentar el motor. Por lo tanto se hace necesario el uso de un elemento que nos limite la presión en el colector de admisión. Este elemento se llama válvula de descarga o válvula waste gate (4).

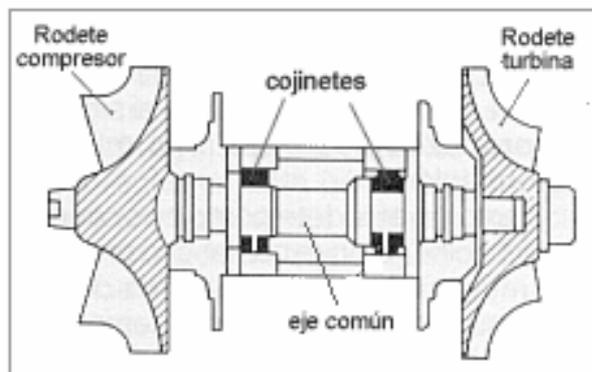


Figura 3.3. Válvula Waste Gate

3.1.3. REGULACIÓN DE LA PRESIÓN TURBOCOMPRESOR

Para evitar el aumento excesivo de vueltas de la turbina y compresor como consecuencia de una mayor presión de los gases a medida que se aumenten las revoluciones del motor, se hace necesaria una válvula de seguridad (también llamada: válvula de descarga o válvula waste gate). Esta válvula está situada en derivación, y manda parte de los gases de escape directamente a la salida del escape sin pasar por la turbina.

La válvula de descarga o wastegate esta formada por una cápsula sensible a la presión compuesta por un muelle (3), una cámara de presión y un diafragma o membrana (2). El lado opuesto del diafragma esta permanentemente condicionado por la presión del colector de admisión al estar conectado al mismo por un tubo (1). Cuando la presión del colector de admisión supera el valor máximo de seguridad, desvía la membrana y comprime el muelle de la válvula despegándola de su asiento. Los gases de escape dejan de pasar entonces por la turbina del sobrealimentador (pasan por el bypass (9)) hasta que la presión de alimentación desciende y la válvula se cierra.

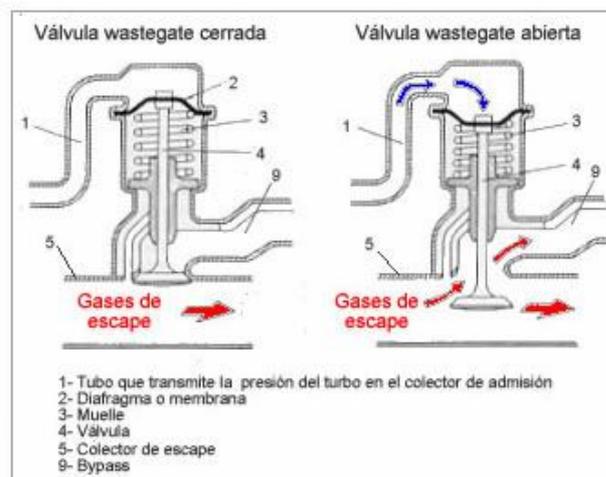


Figura 3.4. Activación de la válvula waste gate

La presión máxima a la que puede trabajar el turbo la determina el fabricante y para ello ajusta el tarado del muelle de la válvula de descarga. Este tarado debe permanecer fijo a menos que se quiera

intencionadamente manipular la presión de trabajo del turbo, como se ha hecho habitualmente. En el caso en que la válvula de descarga fallase, se origina un exceso de presión sobre la turbina que la hace coger cada vez mas revoluciones, lo que puede provocar que la lubricación sea insuficiente y se rompa la película de engrase entre el eje común y los cojinetes donde se apoya. Aumentando la temperatura de todo el conjunto y provocando que se fundan o gripen estos componentes.

3.1.4. TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO

Como se ve en la figura las temperaturas de funcionamiento en un turbo son muy diferentes, teniendo en cuenta que la parte de los componentes que están en contacto con los gases de escape pueden alcanzar temperaturas muy altas (650 °C), mientras que los que esta en contacto con el aire de aspiración solo alcanzan 80 °C.

Estas diferencias de temperatura concentrada en una misma pieza (eje común) determinan valores de dilatación diferentes, lo que comporta las dificultades a la hora del diseño de un turbo y la elección de los materiales que soporten estas condiciones de trabajo adversas.

El turbo se refrigera en parte ademas de por el aceite de engrase, por el aire de aspiración cediendo una determinada parte de su calor al aire que fuerza a pasar por el rodete del compresor. Este calentamiento del aire no resulta nada favorable para el motor, ya que no solo dilata el aire de admisión de forma que le resta densidad y con ello riqueza en oxigeno, sino que, además, un aire demasiado caliente en el interior del cilindro dificulta la refrigeración de la cámara de combustión durante el barrido al entrar el aire a una temperatura superior a la del propio refrigerante liquido.

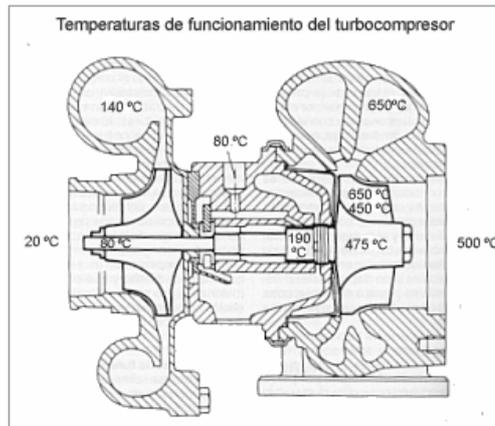


Figura 3.5. Temperatura de funcionamiento del turbocompresor

Cuando el motor está en funcionamiento, la carcasa central se integra en el circuito de refrigeración del motor. Tras pararse el motor, el calor que queda se expulsa utilizando un pequeño circuito de refrigeración que funciona mediante una bomba eléctrica de agua controlada por un termostato. En un principio cuando se empezó la aplicación de los turbocompresores a los motores de gasolina, no se tuvo en cuenta la consecuencia de las altas temperaturas que se podían alcanzar en el colector de escape y por lo tanto en el turbo que esta pegado a el como bien se sabe. La consecuencia de esta imprevisión fue una cantidad considerable de turbos carbonizados, cojinetes defectuosos y pistones destruidos por culpa de la combustión detonante. Hoy en día los caracteres de los cojinetes de los turbocompresores utilizados para sobrealimentar motores Otto se refrigeran exclusivamente con agua y se han desarrollado y se aplican materiales más resistentes al calor. Los fondos de los pistones de los motores turbo casi siempre se refrigeran por medio de inyección de aceite. Con estas medidas se han solucionado la mayor parte de los problemas que tienen los motores de gasolina sobrealimentados por turbocompresor, eso si, siempre teniendo presente que si por algún motivo la temperatura de escape sobrepasa durante un tiempo prolongado el limite máximo de los 1000°C el turbo podrá sufrir daños.

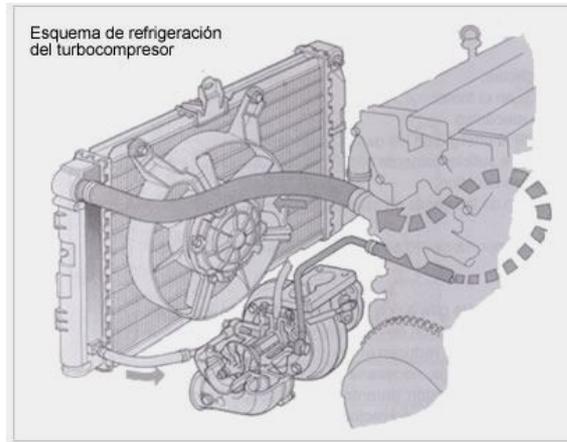


Figura 3.6. Esquema de refrigeración

3.1.5. RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO Y CUIDADO PARA LOS TURBOCOMPRESORES

- Intervalos de cambio de aceite
- Mantenimiento del sistema de filtro de aceite
- Control de la presión de aceite
- Mantenimiento del sistema de filtro de aire

El 90% de todos los fallos que se producen en turbocompresores se debe a las siguientes causas:

- Penetración de cuerpos extraños en la turbina o en el compresor
- Suciedad en el aceite
- Suministro de aceite poco adecuado (presión de aceite/sistema de filtro)
- Altas temperaturas de gases de escape (deficiencias en el sistema de encendido/sistema de alimentación).

Estos fallos se pueden evitar con un mantenimiento frecuente. Cuando, por ejemplo, se efectúe el mantenimiento del sistema de filtro de

aire se debe tener cuidado de que no se introduzcan fragmentos de material en el turbocompresor.

3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TURBOCOMPRESORES

Los turbocompresores se clasifican, según la dirección del flujo, en los tres tipos siguientes:

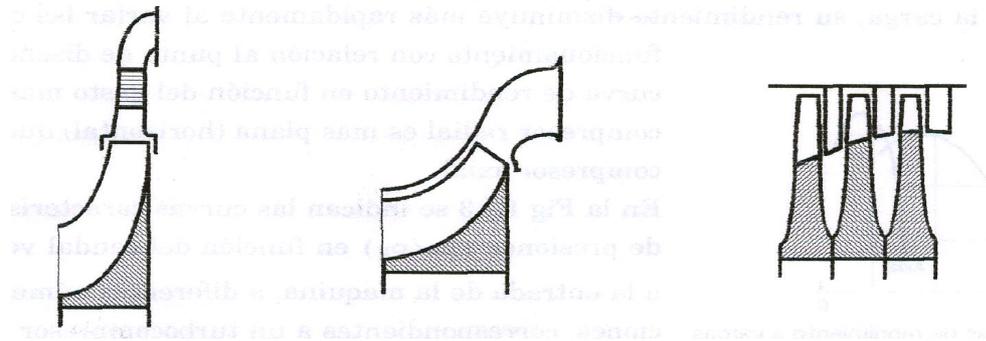


Figura.3.7. Corte de un turbocompresor: a) Radial; b) Diagonal; c) Axial.

Los turbocompresores radiales y diagonales se denominan turbocompresores centrífugos; los turbocompresores diagonales no son muy corrientes y su teoría fundamental no difiere de la de los turbocompresores radiales. El turbocompresor diagonal puede suministrar un caudal 2 - 3 veces mayor que un turbocompresor del mismo diámetro con un rendimiento un 5% mayor. Se utiliza para humos, gas de alto horno, plantas de desulfuración, industrias de productos farmacéuticos y alimenticios, túneles de aireación, etc.)

3.3. COMPARACIÓN DE LOS TURBOCOMPRESORES CENTRÍFUGOS Y LOS AXIALES

El turbocompresor centrífugo tiene las siguientes ventajas sobre el turbocompresor axial:

- a) Mayor robustez y, por tanto, mayor seguridad en la explotación

- b) Menor número de escalonamientos
- c) Mayor facilidad de alojamiento de los sistemas de refrigeración intermedia
- d) Mayor zona de estabilidad de funcionamiento, por lo que respecta al fenómeno de bombeo

El turbocompresor axial ofrece las siguientes ventajas con relación al turbocompresor radial:

- a) Mejor rendimiento
- b) Para un mismo gasto másico y presión, mayor número de revoluciones
- c) El turbocompresor axial tiene menor volumen, menor superficie frontal, y menor peso para igualdad de gasto másico y de relación de compresión. Esta ventaja es excepcionalmente importante en aviación, e históricamente constituyó el estímulo para la evolución del turbocompresor axial con destino a los turborreactores; la ventaja se hace patente en el campo de las relaciones de compresión elevadas y grandes potencias; por esta razón, los turbo-compresores de los motores Turbina de gas de gran potencia suelen ser axiales y los de los motores Turbina de gas de pequeña potencia, radiales.

Si la relación de compresión es pequeña, ésta se puede lograr con un turbocompresor radial de un solo escalonamiento, con lo cual el peso y volumen de la máquina será menor que si se empleara un turbocompresor axial, que necesariamente tendría que ser de varios escalonamientos.

La relación de compresión por escalonamiento es: Escalonamiento turbocompresor radial: máxima realizable de, 3 + 5; valores normales de, 1,5 +2,5. Escalonamiento turbocompresor axial: máxima realizable de, 1,5 +2; valores normales de, 1,05 +1,2

3.3.1. RENDIMIENTO DE LOS TURBOCOMPRESORES

Aunque el turbocompresor axial tiene mejor rendimiento que el radial, es mucho más sensible a las variaciones de la carga; su rendimiento disminuye más rápidamente al variar las condiciones de funcionamiento con relación al punto de diseño, Figura 3.8; la curva de rendimiento en función del gasto másico del turbocompresor radial es más plana (horizontal) que la del turbocompresor axial.

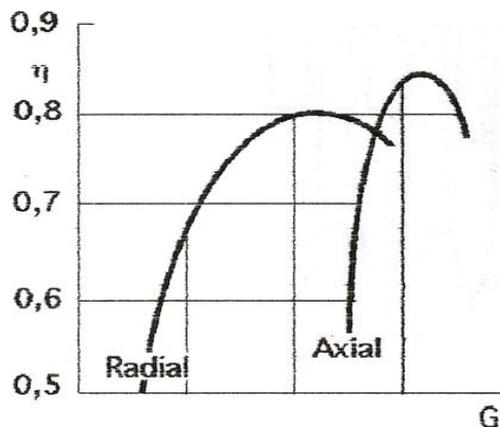


Figura 3.8. Curvas típicas de rendimiento a cargas parciales

En la Figura 3.9 se indican las curvas características relación de presiones (ρ_F / ρ_E) en función del caudal volumétrico Q_E a la entrada de la máquina, a diferentes números de revoluciones, correspondientes a un turbocompresor radial y axial respectivamente.

En el punto nominal o de diseño, que viene determinado por el caudal volumétrico nominal a la entrada Q_{ent} y la relación de presiones

nominal $\left(\frac{\rho_F}{\rho_E}\right)_{no\ min\ al}$ el rendimiento es máxima, siendo en general, más elevado en el turbocompresor axial

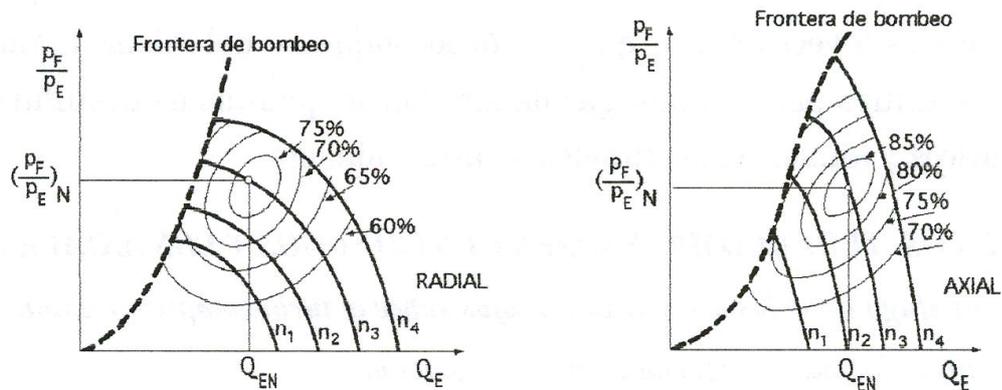


Figura 3.9. Curvas características de un turbocompresor:
a) radial; b) axial, con las curvas límites de bombeo

3.3.2. INCREMENTO DE PRESIÓN

3.3.2.1. Turbocompresor Axial

El incremento de presión producido en el rodete se debe al frenado de la corriente que crea un efecto de difusión en el rodete, y se presenta, tanto en el turbocompresor axial como en el centrífugo, el incremento de energía cinética en el difusor.

3.3.2.2. Turbocompresor radial

La fuerza centrífuga origina un incremento de presión en el rodete expresado y secundariamente el frenado de la corriente en el rodete (efecto de difusión).

El aumento de presión en un turbocompresor se consigue más eficientemente en la corona móvil que en la corona fija. En la corona fija se dispone del efecto de difusión debido a la variación de energía cinética que no proporciona un buen rendimiento, por lo que el turbocompresor radial, gracias al término debido a la fuerza

centrífuga, es más apropiado para grandes presiones, las cuales se consiguen aumentando el nº de rpm y la relación de diámetros $\frac{d_2}{d_1}$

Los turbocompresores axiales se pueden construir más compactos, ahorrando volumen y peso, ya que no necesitan canales para dirigir el flujo desde la periferia a la entrada del rodete siguiente como los turbocompresor radiales, por lo que tienen menos pérdidas y mejor rendimiento (un 10% superior) que el turbocompresor radial.

Los rendimientos que se suelen alcanzar en los turbocompresores actuales, según tipo y ε_c , se indican en la Tabla III.1

Tabla III.1. Rendimientos en los turbocompresores

Tipo	Relación de compresión	Rendimiento
Refrigeraciones múltiples escalonadas	5 - 10	Total refrigeración = 0,55 a 0,8
Un escalonamiento	1,3 - 2	Interno = 0,65 a 0,68
Soplante AP, 1 escalonamiento	2,5 - 5-4	Total adiabático = 0,60 a 0,82
Soplante MP, 1 escalonamiento	1,2 - 2,5	Total adiabático = 0,62 a 0,85
Soplante BP, 1 o más escalonamientos	1,1 - 1,5	Total adiabático = 0,68 a 0,88
Escalonamiento de TC axial	1,05 - 1,2	Interno escalón = 0,86 a 0,92

3.3.3. CAMPO DE APLICACIÓN

Los turbocompresores radiales permiten:

- Velocidades periféricas máximas en el primer escalonamiento, 450 - 500 m/seg.
- Ángulos β_2 entre 50° y 90° (muy frecuente $\beta_2 = 90^\circ$, alabes de salida radial)
- Relación de compresión:
 - De un escalonamiento: 1,7 + 3 (a veces hasta 5)
 - Turbocompresor de escalonamiento único ≤ 5
 - Turbocompresor de dos escalonamientos ≤ 7
- Caudal másico:
 - Aspiración sencilla ≤ 30 Kg. /seg.
 - Aspiración doble ≤ 60 Kg. /seg.

Los turbocompresores axiales permiten:

- Velocidades periféricas máximas en el primer escalonamiento: 250 - 350 m/seg.
- Coeficiente depresión y de un escalonamiento: 0,6 - 1
- Relación de compresión de un escalonamiento: 1,1 - 1,2 (a veces hasta 1,3)
- Número de escalonamientos:
 - Para: $\varepsilon_c = 6$; $z = 10 - 12$
 - Para: $\varepsilon_c = 12$; $z = 16 - 18$

En la actualidad el turbocompresor radial es sustituido cada vez más por el turbocompresor axial, debido a las siguientes circunstancias:

- El turbocompresor radial apenas se emplea en los turborreactores, debido a la mayor superficie frontal que posee, respecto al turbocompresor axial.

- El turbocompresor radial se emplea sólo en la gama de potencias entre 500 - 1500 kW.
- El turbocompresor radial se construye con uno o dos escalonamientos, con admisión sencilla o doble.

3.4. DIAGRAMA DE VELOCIDAD DE LA TURBINA

El fluido ingresa por una voluta caracol similar a la del compresor centrífugo, para alimentar la periferia uniformemente. Luego pasa por una corona de paletas similar al difusor de paletas del compresor centrífugo, donde adquiere una componente radial y se acelera (toberas). La velocidad absoluta de entrada al rotor se indica en la Figura 3.10 como C_1 :

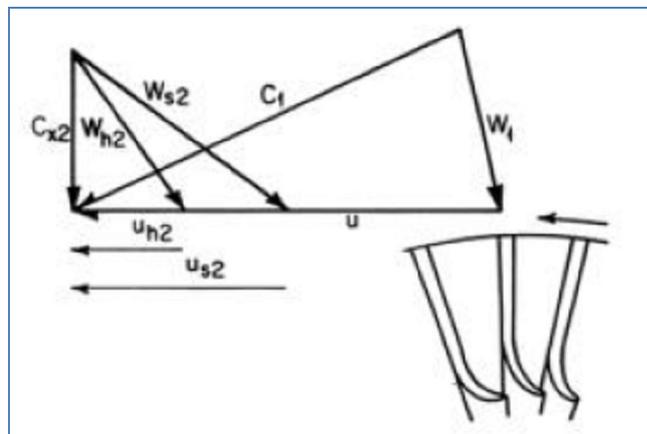


Figura 3.10. Diagrama de velocidades

La velocidad relativa del flujo es W_1 , que es generalmente paralela a las paletas, aunque en la figura se indica ligeramente retrasada. En una situación similar a la del compresor centrífugo, la primera parte del canal del rotor (la entrada radial) sólo sirve para recibir el flujo sin pérdidas por choque y guiarlo al interior del canal. Contrariamente a lo que pudiera parecer, el flujo entrante no impulsa a las paletas.

A medida que el flujo se mueve hacia el interior del canal se acerca al eje en dirección radial. Según la ley de conservación de la cantidad de movimiento

angular, tenderá a acelerarse, moviéndose con una velocidad periférica mayor que la del rotor. Sin embargo, la presencia de las paletas impide esta aceleración, y el flujo ejerce presión sobre la cara más avanzada en la dirección de movimiento (cara de presión). Esta presión, y la correspondiente menor presión en la otra cara de la paleta, desarrollan la fuerza sobre la paleta, y subsiguiente torque y potencia en el eje.

El flujo luego es obligado a girar para tomar la dirección axial, y llega al reductor (correspondiente al inductor del compresor centrífugo). La función del reductor es impartir al flujo una componente tangencial igual y opuesta a la velocidad periférica, a fin de que salga del rotor con una velocidad absoluta perfectamente axial. Contrariamente a lo que pudiera suponerse, la forma del reductor no implica que se produzca impulsión de la rueda por el chorro de gases. El torque se obtiene de la presión que ejercen los gases sobre la paleta al cambiar su impulso angular.

Se nota que debido al cambio de radio hay una variación en la velocidad U en el reductor (en la figura, U_{h2} y U_{s2} son las velocidades en la maza o hub y en la cubierta o shroud). Para obtener una velocidad de salida axial sería necesario alabear el borde de salida de la paleta. Esto encarece la manufactura del rotor y acarrea problemas de fuerzas centrífugas, por lo que usualmente no se considera, y el diseño se basa en un diámetro medio igual a la media geométrica de los radios de maza y cubierta (en la figura, la velocidad C_{x2} es la que corresponde al radio medio).

Contrariamente a lo que sucede en el compresor centrífugo, no se presenta el fenómeno de deslizamiento (slip), aunque sí hay flujos secundarios de rotación debido a los cambios de dirección del flujo y a la rotación alrededor del eje. La primera parte del canal generalmente guía satisfactoriamente al flujo si el número de paletas es adecuado, estando limitado por la reducción que causa en la sección de salida.

3.5. ENGRASE DEL TURBO

Como el turbocompresor esta sometido a altas temperaturas de funcionamiento, el engrase de los cojinetes deslizantes es muy comprometido, por someterse el aceite a altas temperaturas y desequilibrios dinámicos de los dos rodets en caso de que se le peguen restos de aceites o carbonillas a las paletas curvas de los rodets (alabes de los rodets) que producirán vibraciones con distintas frecuencias que entrando en resonancia pueden romper la película de engrase lo que producirá microgripajes. Además el eje del turbo esta sometido en todo momento a altos contrastes de temperaturas en donde el calor del extremó caliente se transmite al lado mas frió lo que acentúa las exigencias de lubricación porque se puede carbonizar el aceite, debiéndose utilizar aceites homologados por el API y la ACEA para cada país donde se utilice.

Se recomienda después de una utilización severa del motor con recorridos largos a altas velocidades, no parar inmediatamente el motor sino dejarlo arrancado al ralentí un mínimo de 30 seg. Para garantizar una lubricación y refrigeración optima para cuando se vuelva arrancar de nuevo. El cojinete del lado de la turbina puede calentarse extremadamente si el motor se apaga inmediatamente después de un uso intensivo del motor. Teniendo en cuenta que el aceite del motor arde a 221 °C puede carbonizarse el turbo.

El engrase en los turbos de geometría variable es mas comprometido aun, por que ademas de los rodamientos tiene que lubricar el conjunto de varillas y palancas que son movidas por el depresor neumático, al coger suciedades (barnices por deficiente calidad del aceite), hace que se agarroten las guías y compuertas y el turbo deja de trabajar correctamente, con perdida de potencia por parte del motor.

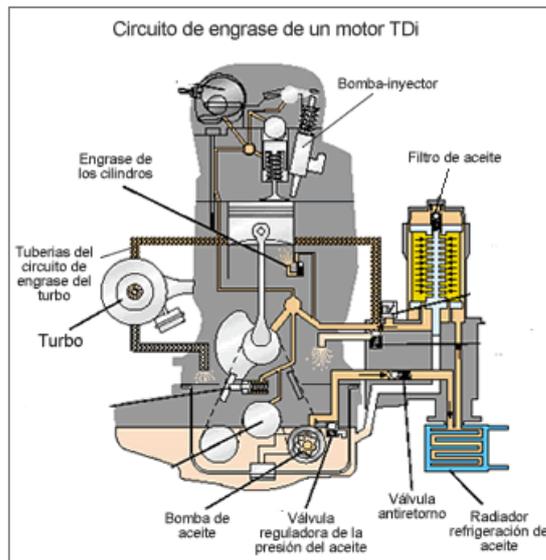


Figura 3.11. Circuito de engrase

3.6. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Puesto que los turbocompresores trabajan a altas temperaturas y velocidades del gas y a elevada frecuencia de giro del rotor, ante el material y la calidad de las piezas coladas se plantean requisitos especiales.

El cuerpo del compresor se produce fundiendo la aleación AL-9 en coquilla, mientras que el cuerpo de la turbina, se hace de hierro de fundición resistente al calor y sólo en casos aislados emplea fundición gris. Los cuerpos de los cojinetes flotantes fijos se fabrican colando la aleación de aluminio AL-9 y cuando tienen casquillos giratorios, aquellos se producen de hierro fundido; para fabricar los aros de empaquetadura con efecto de muelle que se encuentran en la cavidad de aceite, se usa hierro fundido especial, semejante al utilizado en los segmentos de pistón.

Las ruedas de compresores se producen de una aleación de fundición a base de aluminio; la colada se hace en una coquilla mediante uno de los tres procedimientos siguientes: centrífugo, a presión o por enrarecimiento.

La rueda de la turbina funciona en un medio agresivo de los gases de escape del motor Diesel a una temperatura de hasta 700° C y una frecuencia de rotación de 80000..... .120000 r.p.m., en condiciones de altas tensiones generadas por la vibración de los alabes y las fuerzas centrífugas. Debido a esto el material usado para las ruedas de turbina ha de tener alta resistencia a la vibración y estabilidad térmica, así como gran resistencia a la rotura causada por las fuerzas centrífugas. Las ruedas de turbina se fabrican de aleaciones a base de níquel coladas en vacío según los modelos de la cera pérdida.

Para fabricar los cojinetes de los turbocompresores en la mayoría de los casos se emplean bronce de estaño que responden de modo más completo a los requisitos indicados. ¹

Tabla III.4. Propiedades mecánicas principales de los materiales empleados para fabricar las piezas de los turbocompresores

Parámetro	Rueda			Cuerpo del compresor y de los cojinetes	Cojinete
	del compresor	de la turbina			
	Marca de la aleación				
	AL-4	ANV-300	EI-765	AL-9	OS-10-10
Resistencia a la rotura por tracción, kgf / mm ² (MPa)	24 (235,2)	—	—	21 (205,8)	—
Alargamiento relativo, %.....	3	18	20	2—4	3
Dureza, HB.....	70	315—350	310	60	70
Límite de resistencia a la tracción, kgf/mm ² (MPa) ...		85 (833)	105 (1029)	—	15 (147)
Coefficiente de rozamiento con lubricante	—	—	—	—	0,007
Conductibilidad térmica, cal/(cm-s-°C)	—	—	—	—	0,108

¹ Vsórov A., Manual de motores diesel para tractores. Editorial Mir Moscú, 1986

Resistencia, kgf-m/cm ²	—	2,5 (24,5 x 104)	8 (78,4x1 04)	—	—
Resistencia a largo plazo, a 700 °C y 100 h, kgf/mm ² (MPa)	—	45—49 (441—480)	31—35 (304—343)	—	—

3.7. INTERCOOLER O POSTENFRIADOR DEL AIRE DE ADMISIÓN

El intercooler o enfriador intermedio es un intercambiador de calor aire-aire, en el motor de ciclo Diesel es utilizado para elevar la densidad del aire de sobrealimentación que entra en el motor y de esta forma aumentar la masa de aire que sale del compresor del turbo hacia el motor.

Independientemente del fluido a enfriar estos intercambiadores de calor se clasifican en intercambiadores aire-aire y agua-aire.

En los intercambiadores agua-aire el enfriamiento se lo hace mediante la derivación del circuito de refrigeración del motor o mediante un fluido que se mueve en un circuito separado independiente con radiador para su enfriamiento.

3.8. MECANISMOS BÁSICOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

3.8.1. CONDUCCIÓN

Se define como la transferencia de calor debida a una diferencia de temperaturas, sin desplazamiento apreciable de partículas. La conducción implica la transferencia de energía cinética de una molécula a otra adyacente. Es el mecanismo de transmisión de calor en sólidos y se estudia haciendo uso de la ecuación general de conservación de la energía.

3.8.2. CONVECCIÓN

La transmisión de calor por convección implica la transferencia de calor por mezcla de una parte del fluido en otra. El movimiento del fluido puede producirse por diferencia de densidades causadas por la diferencia de temperaturas, como en la convección natural, o bien por medios mecánicos, como en la convección forzada.

Es el mecanismo principal de transmisión de calor en fluidos, y para estudiarla se hace uso de leyes experimentales y analogías al no poder definir el estado turbulento.

Es importante distinguir que la convección puede ser:

3.8.2.1. Convección Natural

Si el movimiento del fluido se produce por diferencias de densidad causadas a su vez por la temperatura.

3.9.2.2. Convección Forzada

Si el movimiento del fluido se produce impulsado por elementos mecánicos. Además pueden ocurrir cambios de fase.

3.8.3. RADIACIÓN

Un cuerpo caliente emite energía radiante en todas las direcciones. Cuando esta energía alcanza otro cuerpo, parte de ella puede reflejarse, otra parte puede ser transmitida a través del cuerpo, y el resto es absorbido y transformado en calor.

A temperatura elevada la transmisión de calor por radiación es siempre importante, y a veces lo es a temperatura ambiente. La transmisión por radiación es exclusiva del calor y difiere mucho de todas

las otras formas materiales de transporte, especialmente en que no necesita la presencia de un medio material, de hecho necesita la ausencia de medio o que el medio sea transparente.

Se estudia haciendo uso de las leyes básicas de la radiación así como algunas leyes experimentales.

3.9. ESTRUCTURA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJOS CRUZADOS

En el enfriamiento o calentamiento de gases es interesante utilizar un intercambiador de calor en flujo cruzado, en el que uno de los fluidos (líquido o gas) circula por el interior de los tubos, mientras que al otro fluido (gaseoso) se le obliga a circular perpendicularmente al haz de tubos; el flujo del fluido exterior puede realizarse mediante convección forzada o libre; el gas que circula por el exterior de los tubos se considera de tipo de mezcla, mientras que el fluido del interior de los tubos se considera sin mezclar; el flujo del gas exterior es con mezcla porque puede moverse libremente entre los tubos cuando intercambia calor, mientras que el fluido del interior de los tubos está confinado y no puede mezclarse con ningún otro flujo o corriente durante el proceso de intercambio de calor.

En un proyecto de intercambiadores de calor es importante especificar si los fluidos están mezclados o sin mezclar y cuál de los fluidos está mezclado. Es importante también equilibrar los gradientes de temperatura mediante la obtención de coeficientes de transmisión de calor aproximadamente iguales en el interior y en el exterior de los tubos; si ésto no se hace así, una de las resistencias térmicas puede ser grande, lo que provocará una caída de temperatura global también grande para una transferencia de calor por unidad de tiempo determinada, lo que exige un equipo mayor, con el consiguiente perjuicio económico.

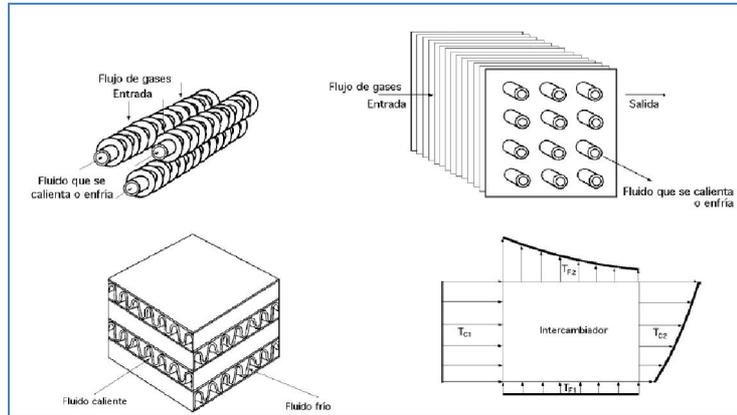


Figura 3.12. Estructura del intercambiador de calor

Las pantallas, (placas deflectoras), son discos circulares de una plancha metálica a los que se ha cortado, para estos intercambiadores, un cierto segmento circular (figura 3.13) de forma que la altura de este segmento sea igual a la cuarta parte del diámetro interior de la carcasa, por lo que las placas deflectoras así obtenidas se denominan placas del 25%, viniendo perforadas para recibir los tubos; para evitar fugas, o hacer que estas sean mínimas, las holguras entre las placas y la carcasa, y entre las placas y los tubos deben ser pequeñas. Este tipo de construcción resulta práctico solamente para carcasas pequeñas.

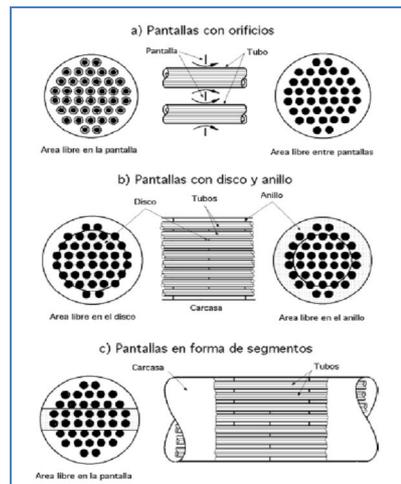


Figura 3.13. Pantallas utilizadas en los intercambiadores de calor de carcasa y tubos

La carcasa tiene un diámetro normalizado; la distancia o espaciado entre placas no debe ser menor de 1/5 del diámetro de la carcasa ni mayor que el

diámetro interior de la misma. Los tubos se unen a la placa tubular acanalando los orificios y acampanando en su interior los extremos de los tubos mediante un mandril cónico rotatorio que fuerza al metal del tubo más allá de su límite elástico, de forma que el metal se introduce en las acanaladuras; en los intercambiadores que van a trabajar a presiones elevadas, los tubos se sueldan a la placa tubular.

En general, el intercambiador de calor de carcasa y tubos tiene unas placas (cabezales) en donde se fijan los tubos por ambos extremos, mediante soldadura u otro tipo de fijación; este tipo de construcción tiene un bajo costo inicial, pero sólo se puede utilizar para diferencias pequeñas de temperatura entre el fluido caliente y el frío, puesto que no se ha hecho ninguna previsión para evitar las tensiones mecánicas de origen térmico debidas a la dilatación entre los tubos y la carcasa.

Otra desventaja consiste en que el montaje del haz de tubos no se puede desmontar para su limpieza; estos inconvenientes se solucionan fácilmente haciendo que una de las placas de tubos esté fija, mientras que la otra se sujeta mediante pernos a un cabezal flotante que permite el movimiento relativo entre el haz de tubos y la carcasa; la placa de tubos flotante está sujeta con mordazas entre la cabeza flotante y unas bridas, de modo que es posible retirar el haz de tubos para su limpieza.

Los tubos se fabrican en todos los metales corrientes con un determinado diámetro exterior y un definido espesor de pared, según el número BWG. Los tubos se disponen según una ordenación triangular (tresbolillo) o rectangular (regular); cuando el lado de la carcasa tiene gran tendencia a ensuciarse no se utiliza la disposición triangular por cuanto los espacios entre tubos son de difícil acceso, cosa que no sucede en la disposición cuadrada, que a su vez provoca una menor caída de presión en el lado de la carcasa que la disposición triangular.

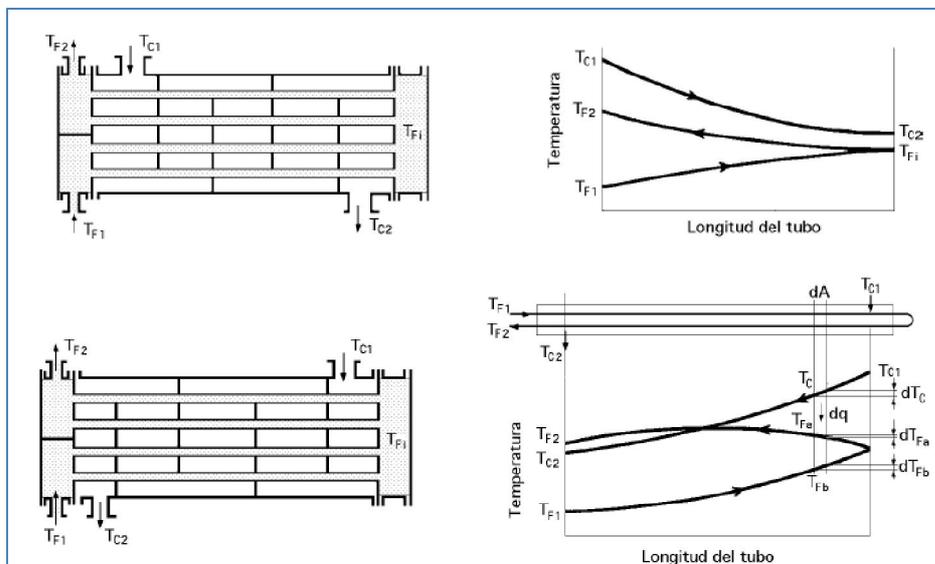


Figura 3.14. Distribución de temperaturas en intercambiadores

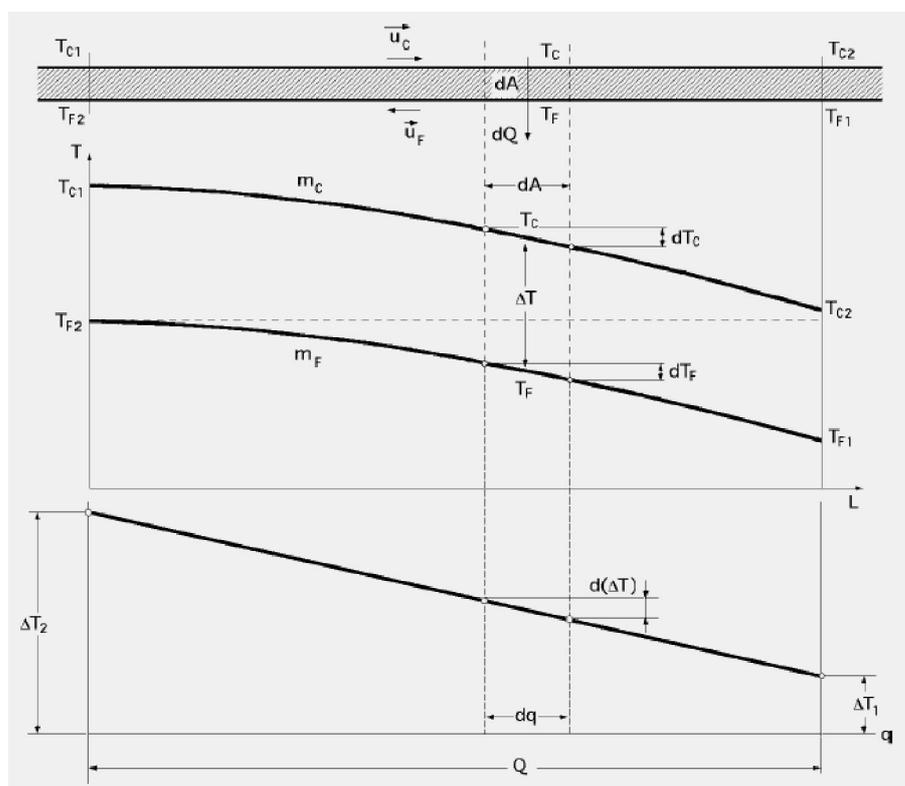


Figura 3.15. Distribución de temperaturas en intercambiadores de calor con flujos en contra corriente y de un solo paso de tubos.

3.10. CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

3.10.1. TURBO CARGADOS POSTENFRIADOS AIRE-AGUA

Cuando el turbo cargador comprime el aire, se incrementa la temperatura de éste a niveles entre 120 y 200 °C, según el modelo y el tamaño del motor. El postenfriamiento consiste en enfriar el aire de admisión después de ser comprimido para aumentar su densidad, de esa manera en el mismo espacio (el cilindro) habrá mayor cantidad de aire disponible para mezclarse con una mayor cantidad de diesel.

Los motores postenfriados aire-agua hacen pasar el aire de admisión por una camisa refrigerada con agua del sistema de enfriamiento, que se encuentra a una temperatura cercana a los 95°C, y de ahí a los cilindros.

3.10.2. TURBO CARGADOS POSTENFRIADOS AIRE-AIRE.

En estos modelos, el aire se enfría al hacerlo pasar por un postenfriador, que básicamente es un radiador. El postenfriador se coloca enseguida del radiador de enfriamiento del agua, y ambos reciben aire del ventilador.

De esta manera se logra bajar la temperatura del aire de admisión a por debajo de los 60°C.

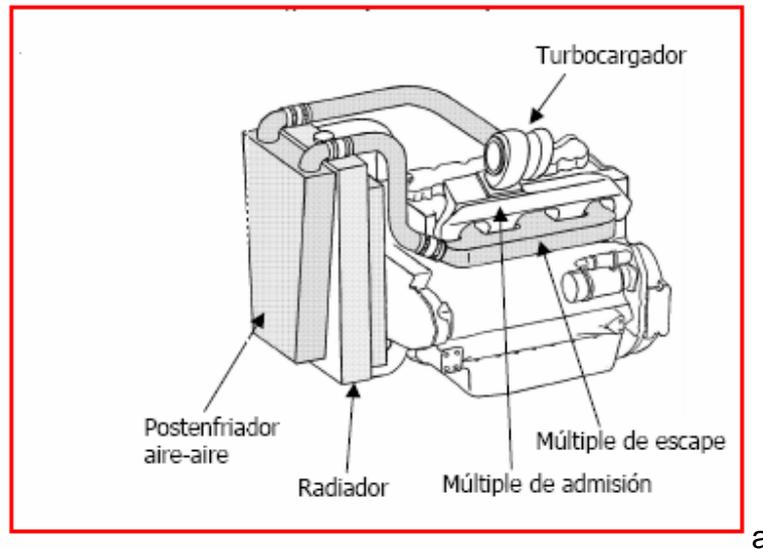


Figura 3.16. Intercambiador de calor aire – aire

Tabla III.5. Análisis de los sistemas de intercambiadores de calor

SISTEMA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Frontal AIRE – AIRE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buenas prestaciones ▪ Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Implantación obligatoria en el frontal del vehículo
Compacto AIRE – AIRE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tecnología dominada ▪ Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prestaciones limitadas
Frontal AIRE - LÍQUIDO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Implantación en cualquier lugar cerca del radiador del motor 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costo elevado ▪ Necesidad de un circuito de baja temperatura

Sistemas aire a aire son diseñados para dirigir cargas de aire de la salida del turbo, a través de ductos de goma en forma de codos de 90 y 45 grados, hacia un intercambiador de calor montado frente al radiador y luego regresado a través de mas tubos y codos a la cámara del motor. Toda esta tubería contribuye a perdidas por fricción, reducción de la presión y una densidad de aire mas baja.

Este tipo de sistema esta también sujeto al calor por convección, generado por otros componentes bajo estas condiciones.

Finalmente, un motor turbo cargado con un enfriador aire a aire puede perder mas del 40% de la presión inicial, una perdida neta en la densidad del aire de entrada.

Considerando que los enfriadores aire-a-agua son más pequeños y pueden ser montados en una vía más pequeña entre el súper cargador y la cámara de entrada del motor, la fuente externa de aire para enfriamiento y las perdidas por fricción son casi completamente eliminadas. El montaje de un enfriador aire a agua en una vía directa entre la fuente de aire cargado, mantiene casi toda la presión inicial y ofrece una carga de aire que es mucho más densa.

Sistemas aire a agua usan un intercambiador de calor adicional localizado al frente del radiador en la vía del aire frío. En este punto esto es en realidad un sistema aire a agua a aire. El agua que circula a través del intercambiador primario absorbe el calor del aire comprimido. El agua es entonces dirigida a un reservorio, a través del Segundo intercambiador (similar a un pequeño radiador), enfriada por flujo de aire y luego retornada al intercooler, lista para absorber calor nuevamente.

Este sistema es totalmente separado del sistema de enfriamiento del motor y es muy eficiente en el enfriamiento continuo del agua y la carga de aire.

En un intercooler sistema aire a agua, el intercambiador de calor secundario puede también estar montado en una ubicación alejada y obtener flujo de aire para enfriar, de un ventilador eléctrico controlado por un switch termostático. Este montaje en una ubicación mas alejada permite un flujo sin obstrucciones por el radiador y el condensador de aire acondicionado y también asegura un mejor enfriamiento del circuito del intercooler.

En resumen, sistemas aire a agua de intercoolers, para aplicaciones de alta performance, ofrecen mejor enfriamiento de la carga de aire que los sistemas aire a aire con más de un 80% de eficiencia. Hay también una enorme reducción en la pérdida de presión causada por fricción. Sistemas aire a agua también ayudan al enfriamiento del motor mediante el uso de intercambiadores de calor secundarios montados a distancia. Estos sistemas también ofrecen gran performance en carretera. El aumento de potencia expresada en caballos de fuerza puede subir desde 20 hp a 120 hp, dependiendo del sistema específico de aplicación.

3.11. SELECCIÓN DEL INTERCOOLER PARA EL MOTOR ISUZU. PARÁMETROS PRINCIPALES.

Para la selección del intercooler se toma en cuenta:

- Consumo del aire de sobrealimentación G_a (Kg./s)
- Temperatura del aire de sobrealimentación a la entrada del enfriador T_{com} (K)
- Presión del aire de sobrealimentación a la entrada del enfriador P_{com} (kgf/cm²)
- Temperatura del aire de sobrealimentación a la salida del enfriador T_s (K)
- Presión, pérdida máxima admisible en el enfriador Δp_s (kgf/cm²)
- Temperatura del aire ambiental (T_o)
- Consumo del aire de sobrealimentación G_a (Kg./s)

Para la determinación del gasto de aire G_a , se ha tomado como referencia los motores que se describen en la tabla III.6, para ello se comparan las características principales tanto del motor Isuzu como las de estos motores. G_a (Kg./s), es calculado por cilindrada unitaria. ²

Tabla III.6. Comparación entre los Motores de referencia y motor de pruebas.

Parámetro	MOTORES DE REFERENCIAS				MOTOR ISUZU
	SMD-20	SMD-72	D-260TN	A-49T	4BD1T
Diámetro x Carrera	120x140	130x115	110x125	130x140	102x118
Numero de cilindros	4L	6V	6L	4L	4L
Cilindrada			7100cc		3856cc
Rel. de compresión	16	15	16	16	16.5
Rpm. Nominal	1900	2100	2200	1750	2800
Rpm. $M_{tor.max}$	1400	1400	1500	1200-1300	1400-1550
G_a , Kg/s	0,155	0,259	0,233	0,194	
ρ_a Kg/m ³	1,670	1,745	1,920	1,786	

Tabla III.7. Valores medios estadísticos de la frecuencia nominal de rotación (rpm) de los motores Diesel en relación con el diámetro del cilindro (D). Motores de producción Americana y Europea.

Producción	$D \leq 110$	$110 < D \leq 130$	$D > 130$

² Vsórov A., Manual de motores diesel para tractores. Editorial Mir Moscú, 1986

Americana	2200...2400	2000...2200	1800...2000
Europea	2200...2300	1800...2100	1800...1900

Se toma como referencia el parámetro G_a del motor D-260TN, por tener relación entre la frecuencia de giro del par motor máximo ($Rpm. M_{tor.max}$) y además por la característica que existe entre el diámetro del cilindro y la frecuencia de rotación del cigüeñal.

1. Temperatura del aire de sobrealimentación a la entrada del enfriador

T_e (°C)

Datos obtenidos gracias al tablero "PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL TURBOCOMPRESOR (MOTOR ISUZU)". Estas muestras son tomadas antes que el motor alcance la temperatura ideal de trabajo.



Figura 3.17. Temperatura de ingreso al turbocompresor y salida al enfriador

Datos obtenidos gracias al tablero "PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL TURBOCOMPRESOR (MOTOR ISUZU)".
Temperatura a la entrada del enfriador.



Figura 3.18. Temperatura de ingreso al turbocompresor y salida al enfriador al alcanzar la temperatura ideal de trabajo de 82°C el motor Isuzu

2. Presión del aire de sobrealimentación a la entrada del enfriador P_{com} (kgf/cm^2)

$$^3 \pi_k = P_k / P_0 \quad P_k / P_0 \leq 2.3$$

P_k = Presión de compresión del turbo

P_0 = Presión de admisión del aire

Dato referencial para la selección: $P_k = 1,5 \text{ bar (kgf/cm}^2\text{)}$

³ Sistemas de sobrealimentación Página 244, Motores de automóvil, Autor: M.S. Jovaj, Editorial: Mir-Moscu ,1982.

3. Temperatura del aire de sobrealimentación a la salida del enfriador (°C)

La temperatura a la salida del enfriador a de estar variando aproximadamente de 32....36 °C.

Para cualquier enfriador aire-aire de motor de combustión interna medianos el ΔT en el enfriador: 4....10 °C

3.12.4. Presión, perdida máxima admisible en el enfriador Δps (kgf/cm²)

La perdida de presión admisible en el enfriador es de un 15.....20% de la presión de compresión del turbocompresor.

4. Temperatura del aire ambiental T_o (°C)

En la Ciudad de Latacunga la temperatura fluctúa entre 10....15 grados centígrados.



Figura 3.19. Enfriador del aire de admisión antes de la selección

Dimensiones del radiador de agua:

- LARGO: 575 mm
- ANCHO: 675 mm

Se toma en consideración las dimensiones del radiador debido a que es la sección de enfriamiento frontal que tiene el motor y posteriormente seleccionar el área de enfriamiento y las dimensiones del radiador de aire.

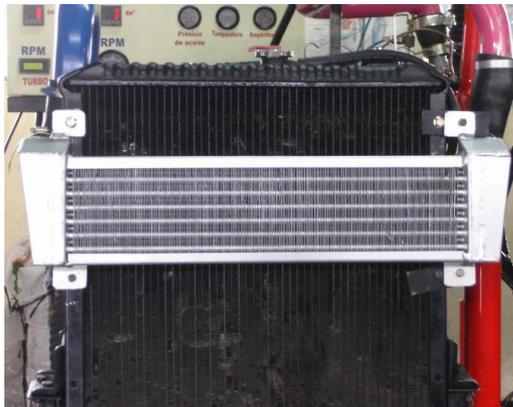


Figura 3.20. Enfriador del aire de admisión seleccionado

IV. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE EN EL MOTOR ISUZU

4.1. RECIRCULACIÓN DE GASES

En la actualidad, pocos elementos están sometidos a tanta normativa y reglamentación como los vehículos. Uno de los apartados más extensos a este respecto es el que afecta a las emisiones anticontaminantes. Una reglamentación cada vez más estricta es convertir a los vehículos en máquinas menos contaminantes y más limpias. Uno de estos sistemas es el EGR

Los motores diesel son típicamente característicos por el consumo bajo de combustible y muy bajas emisiones de CO. Sin embargo las emisiones de NOx de los motores diesel aun permanecen altas.

La formación de estos óxidos de nitrógeno se reduce bajando la temperatura de combustión en determinadas fases del funcionamiento del motor (a baja y media carga). Esto se consigue mediante el sistema EGR, que introduce en los cilindros ciertas cantidades de gases de escape que ya han sido previamente quemados y que prácticamente no contienen oxígeno, por lo que apenas arderán.

La recirculación de gases de escape tiene dos misiones fundamentales, una es reducir los gases contaminados procedentes de la combustión o explosión de la mezcla y que mediante el escape salen al exterior. Estos gases de escape son ricos en monóxido de carbono, carburos de hidrógeno y óxidos de nitrógeno.

La segunda misión de la recirculación de gases es bajar las temperaturas de la combustión o explosión dentro de los cilindros. La adición de gases de escape a la mezcla de aire y combustible hace más fluida a esta por lo que se produce la combustión o explosión a temperaturas más bajas.

4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE EGR

Varios sistemas de recirculación de gases de escape han sido clasificados basándose en la temperatura de recirculación, configuración y presión.

4.2.1 CLASIFICACIÓN BASADA EN LA TEMPERATURA.

4.2.1.1 Recirculación de gases de escape caliente

El gas de escape es recirculado a la admisión sin ser refrigerado, resultado de estos es el incremento de la temperatura de la carga en la admisión.

4.2.1.2. Recirculación de gases de escape enfriado completamente

El gas de escape es enfriado completamente antes de mezclarse con el aire fresco de la admisión, este gas se enfría usando un intercambiador de calor agua-agua. En este caso, la humedad presente en el gas de escape puede condensarse y el resultado de estas las gotas de agua pueden causar efectos indeseables en el interior del cilindro del motor.

4.2.1.3. Recirculación de gases de escape enfriado parcialmente

Para evitar la condensación del agua, la temperatura de los gases de escape se debe mantener apenas por encima de la temperatura de rocío.

4.2.2. CLASIFICACIÓN BASADA EN LA CONFIGURACIÓN.

4.2.2.1. Sistema de largo recorrido (LR)

En un sistema de largo recorrido la presión cae de una parte a otra en la admisión del aire y la presión se estanca en el escape, el flujo de gases de escape hacen posible la recirculación. La velocidad de los gases de escape crean un pequeño tapón en la presión, lo que en combinación con la presión baja después de la admisión de aire, concede un aumento a la diferencia de presión que se lleva a cabo de una parte a otra en la recirculación, es completado por desarrollo de troqué / velocidad de el motor.

4.2.2.2. Sistema de corto recorrido (CR)

Estos sistemas se diferencian principalmente en el método usado para escoger una presión positiva diferente, a través del circuito de recirculación.

Otra manera de controlar el porcentaje de recirculación de gases, es usar un inyector de turbina variable (ITV). La mayoría de los sistemas con (ITV) tienen un acceso sencillo, el cual reduce la eficiencia del sistema por la separación en los pulsos de escape. La refrigeración del sistema de recirculación (EGR) debe ser suministrada efectivamente.

Otros usan un venturi variable, en el que el inyector del sistema de recirculación de gases de escape fue aceptado para moverse axialmente, esto para modificar el área crítica donde fue usado.

4.2.3. CLASIFICACIÓN BASADA EN LA PRESIÓN

Dos rutas diferentes para la recirculación de gases de escape (EGR), designándolas como, presión baja y presión alta, sistemas que pueden ser usados.

4.2.3.1. Sistema de recorrido de baja presión

EL paso para la recirculación es suministrado a partir del flujo descendente de la turbina para el flujo ascendente del lado del compresor.

Esto es admitir que por usar el método de recorrido de baja presión, la recirculación es posible hasta una elevada región de carga, con significativa reducción en emisiones de NOx. Sin embargo, algunos problemas ocurren, los mismos que influyen en la durabilidad, condiciona una alta temperatura de salida del compresor y sobrecarga en el intercooler.

4.2.3.2. Sistema de recorrido de alta presión

La recirculación es transmitida desde un flujo ascendente de la turbina a un flujo descendente del compresor.

En este método de recirculación, si bien la recirculación de gases es posible en las regiones de elevadas cargas, el porcentaje de exceso de aire decrece y el consumo de combustible se incrementa considerablemente.

4.3. RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE, TÉCNICA PARA LA REDUCCIÓN DEL NO_x.

La EGR es una técnica usual para reducir la formación de NO_x en la cámara de combustión. Los gases de escape están compuestos de CO₂, N₂ y vapor de agua principalmente. Cuando una parte de este gas de escape es recirculado hacia el cilindro, este actúa como inhibidor para la mezcla a combustión. Esto también reduce la concentración de O₂, en la cámara de combustión. El calor específico de la EGR es más elevado que el aire fresco, por eso la EGR incrementa la capacidad de calor (calor específico) de la carga de admisión, esto decreta la elevada temperatura y por la misma manera el calor que se emite en la cámara de combustión.

$$\%EGR = \frac{\text{volumen de EGR}}{\text{carga total de admisión dentro del cilindro}} \times 100$$

Otra manera de definir el porcentaje de EGR es por medio del uso de la concentración de CO₂.

$$\%EGR = \frac{[CO_2]_{\text{admisión}} - [CO_2]_{\text{ambiente}}}{[CO_2]_{\text{escape}} - [CO_2]_{\text{ambiente}}}$$

Existen tres justificaciones para el efecto de EGR sobre la reducción de NO_x son, incremento del retraso al encendido, incremento de la capacidad de calor y la inhibición de la carga de admisión con gases inertes.

La hipótesis de retraso al encendido, sostiene que la recirculación de gases causa un incremento en el retraso al 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 provenientes 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 gases sobre el NO_x , es causado por incrementar la cantidad de gases inertes en la mezcla, lo cual reduce la temperatura de la llama adiabática del ciclo.

En elevadas cargas, la recirculación de gases de escape es difícil de emplear debido a que deteriora la difusión de la combustión y esto puede dar como resultado un incremento excesivo de humo y material particulado.

En bajas cargas, los hidrocarburos no quemados contenidos en los gases de recirculación, posiblemente se vuelven a quemar con la mezcla nueva, esto se usa principalmente para disminuir el combustible no quemado en el escape y aumentar la restricción de la eficiencia térmica.

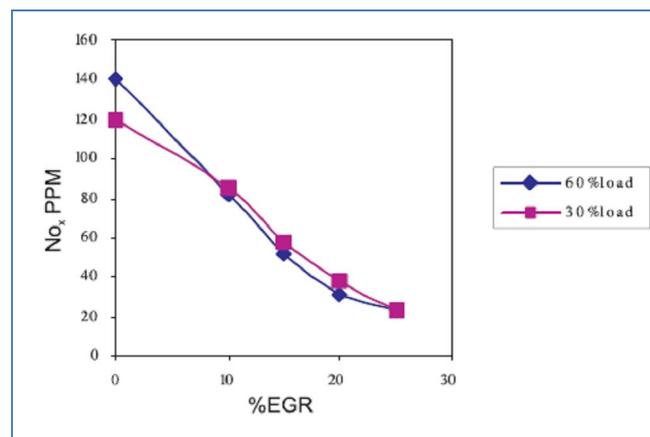


Figura 4.1. Reducción de las emisiones de NO_x debido a la EGR en diferentes cargas.

La implementación de la EGR en los motores diesel tienen problemas como:

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

Cuando los componentes del motor entran en contacto con las partículas de hollín a alta velocidad, las partículas provocan abrasión. En la EGR el ácido sulfúrico y el vapor de agua también causan corrosión.

Algunos estudios han detectado daños sobre las paredes del cilindro debido a la reducción en la capacidad de lubricación del aceite, el cual es impedido de cumplir con su función debido a la mezcla de hollín transportado con el material de partículas en la recirculación. Esto necesita el uso de una eficiente malla o trampa de partículas.

Se ha demostrado que acoplar trampas de partículas y controles de humo, dan como resultado una alta colección-eficiencia en hidrocarburos no quemados y simultáneamente en las emisiones de NO_x.

4.4 COMPONENTES DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES

El Sistema EGR (Exhaust gas recirculation) que reenvía una parte de los gases de escape al colector de admisión, con ello se consigue que descienda el contenido de oxígeno en el aire de admisión que provoca un descenso en la temperatura de combustión que reduce el óxido de nitrógeno (NO_x).

Normalmente el sistema EGR solamente está activado a una carga parcial y temperatura normal del motor.

En la figura se ve un sistema EGR montado en un motor atmosférico.

- 1- Medidor de masa de aire.
- 2- Sensor de revoluciones (RPM).
- 3- Sensor de temperatura.
- 4- Convertidor EGR. (electroválvula de control de vacío)
- 5- Válvula EGR.

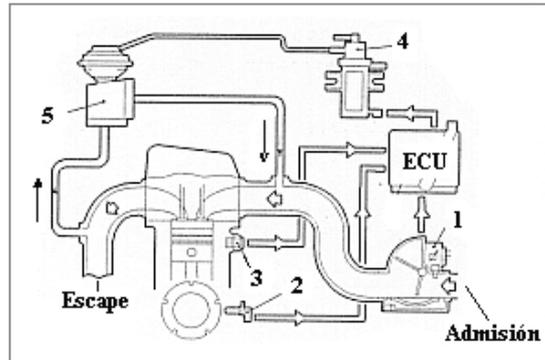


Figura 4.2. Componentes del sistema de recirculación de gases

4.4.1. SENSORES DE ROTACIÓN DEL CIGÜEÑAL (CKP)

Son detectores magnéticos o de efecto hall, que proveen a la Centralita información, en el caso del CKP, sobre la posición del cigüeñal y sobre las r.p.m. El sensor de rotación posee referencia alta y referencia baja directa en el ECM.

El sensor opera a través de la variación de campo magnético generado por el paso de los dientes de una polea dentada del cigüeñal. La rueda dentada con 58 dientes posee un espacio donde faltan dos dientes. El espacio indica el Punto Muerto Superior (PMS).

El sensor inductivo va sufriendo una variación del campo magnético con el paso de cada diente que siempre es el mismo hasta el momento en que falta un diente y su variación se altera con eso se sabe que el motor a dado una vuelta.

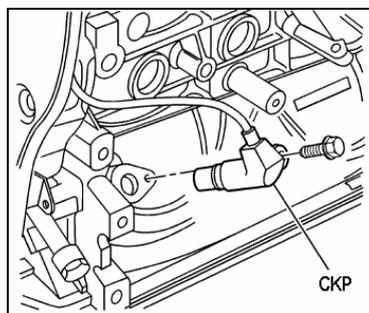


Figura 4.3 Sensor de posición del cigüeñal (CKP)

4.4.2. SENSORES DE TEMPERATURA

Su principal función es medir un cambio en la resistencia de un componente llamado TERMISTOR, y mediante un circuito eléctrico poder conocer un cambio en la temperatura.

El termistor es una resistencia que varia de acuerdo a la temperatura a la cual es expuesta, para esto existen dos tipos de termistor.

NTC (Coeficiente Negativo De Temperatura), este tipo de termistores disminuyen la resistencia interna a medida que aumenta la temperatura a la cual es expuesto, es decir para cada temperatura tienen un valor de resistencia. Si se calienta tendrán menor resistencia que si se enfrían.

PTC (Coeficiente Positivo De Temperatura), este tipo de termistores presentan un cambio ascendente de resistencia a medida que se eleva la temperatura.

4.4.2.1. SENSOR DE TEMPERATURA DEL AGUA (WTS)

El sensor de temperatura del refrigerante consiste en una resistencia sensible a la temperatura es decir un termistor NTC. A medida que se incrementa la temperatura del refrigerante, la resistencia del sensor disminuye.

Este sensor se encuentra en contacto directo con el refrigerante (termómetro de contacto), para poder tomar con la máxima precisión la temperatura del medio.



Figura 4.4. Sensores WTS

4.4.2.2. Sensor de temperatura del aire (IAT)

El sensor de la temperatura del aire tiene como función medir la temperatura del aire. Posee una resistencia que aumenta su resistencia proporcionalmente al aumento de la temperatura del aire.

Este sensor montado en el tramo de admisión registra la temperatura del aire aspirado con la que es posible calcular, en combinación con un sensor de presión de sobrealimentación, la masa de aire aspirada.



Figura 4.5. Sensores IAT

4.4.3. SENSOR DE FLUJO MÁSCICO DE AIRE (MAF)

Este sensor mide la cantidad de aire que ingresa al motor para así poder saber la ECU la cantidad de combustible a dosificar por los inyectores. Para poder medir el flujo del aire, este sensor consta de un delicado hilo de platino que es permanentemente calentado a través de la ECU mediante conmutación de masa.

El Medidor Masa Aire va fijado a la caja del Filtro de Aire y, el sensor de medición, irá en una conducción bypass que consta de un Filamento Térmico (Hilo Platino) y un Sensor Temperatura (resistencia ntc) que será regulado por un Circuito Electrónico de manera que mantenga constante la diferencia de Temperaturas entre Filamento Térmico y Caudal Aire que entra a los Cilindros. Al aumentar la entrada de Aire, debe aumentarse Corriente de Calefacción, regulando su variación un Circuito Electrónico.

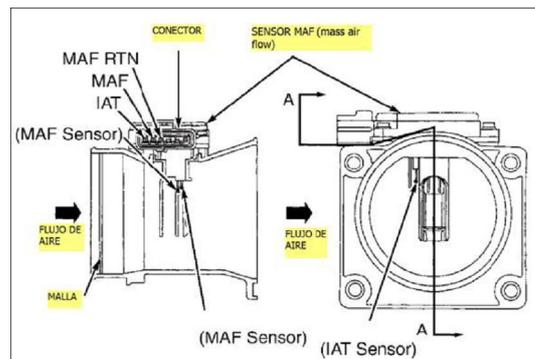


Figura 4.6. Configuración interna del Sensor MAF

4.4.4. VÁLVULA EGR

La válvula EGR, controla la formación de las emisiones de NOx recirculando los gases del escape en la cámara de combustión a través del múltiple de admisión.

En la figura principal tenemos una válvula seccionada y en ella podemos distinguir las siguientes partes:

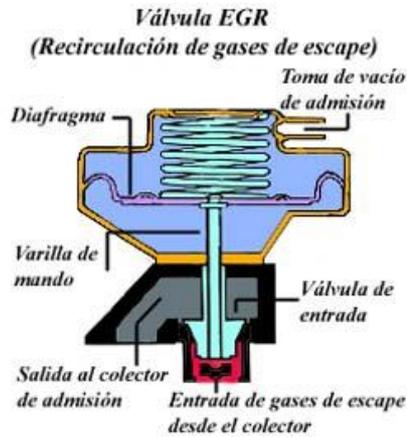


Figura 4.7. Válvula EGR

4.4.4.1 Tipos de válvulas EGR

Las válvulas EGR se clasifican según su funcionamiento en: "neumáticas" y "eléctricas".

Las válvulas EGR neumáticas son accionadas por depresión o vacío. Están constituidas por una membrana empujada por un muelle, que abre o cierra una válvula a través de una varilla hueca en cuyo extremo lleva un punzón. La varilla esta acoplada a la membrana, que se mueve abriendo la válvula cada vez que la depresión actúa sobre la membrana y vence la presión del muelle.



Figura 4.8. Válvula EGR neumática

Las válvula EGR eléctricas se caracterizan por no tener que utilizar una bomba de vacío para su funcionamiento por lo que trabajan de forma autónoma. Constan de un solenoide que actúa al

recibir señales eléctricas de la ECU cerrando o abriendo un paso por el que recirculan los gases de escape.

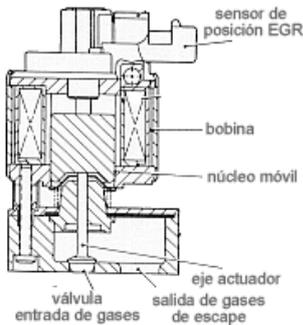


Figura 4.9. Válvula EGR eléctrica

4.4.4.2. Circuito EGR

El circuito EGR presenta un tubo de derivación entre el colector de escape y el de admisión. Una válvula EGR controla el paso de los gases de escape a la admisión por este tubo, abriéndose en función de la fase de funcionamiento del motor.

Hay sistemas, como los que incorporan algunos motores HDI, que, para hacer más eficaz la recirculación, enfrían los gases de escape mediante el refrigerante del motor, logrando una temperatura de combustión aún más baja.

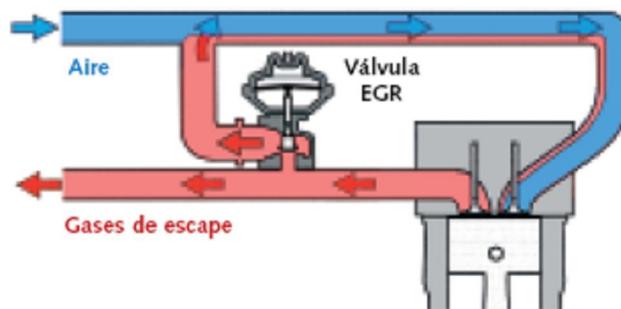


Figura 4.10. Circuito EGR

4.4.4.3. Condiciones de funcionamiento de la EGR

La EGR funciona cuando se lo dicta el calculador del motor, atendiendo a distintos parámetros dependiendo de las características de cada motor. De este modo, la EGR se cerrará si:

- La temperatura del aire es inferior a 15 °C o superior a 60 °C.
- La temperatura del agua del circuito de refrigeración es inferior a 20 °C o superior a 120 °C.
- La presión atmosférica es inferior a 890 mbares.
- La velocidad del vehículo es superior a 120 km/h.
- El valor del régimen motor/potenciómetro de carga es superior a un umbral prefijado.

Estos valores son aproximados, variando para cada tipo de motor.

4.4.5. UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICA (ECU)

Los motores diesel con gestión electrónica, llevan una unidad de control electrónica (ECU). La unidad de control es de técnica digital, funciona como un ordenador, tiene un microprocesador que compara las distintas señales que recibe del exterior (sensores) con un programa interno grabado en memoria y como resultado genera unas señales de control que manda a los distintos dispositivos exteriores que hacen que el motor funcione. La ECU adapta continuamente sus señales de control al funcionamiento del motor. La unidad de control esta colocada en el habitáculo de los pasajeros para protegerla de las influencias externas.

El hecho de usar una ECU tiene la ventaja de reducir el consumo de combustible, mantener bajos los niveles de emisiones de escape al tiempo que mejora el rendimiento del motor y la conducción.

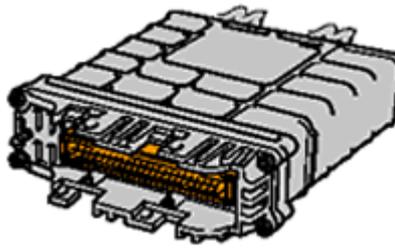


Figura 4.11. ECU

4.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE PARA EL MOTOR ISUZU 4BD1T

El diseño este proyecto esta basado en la implementación de los distintos sistemas de control para la recirculación de gases de escape, tomando en cuenta todos los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento.

Con el desarrollo de este proyecto se provendrá el diseño e instalación del sistema de recirculación de gases para que la carrera disponga de un banco de pruebas sofisticado que sirva para la capacitación y entrenamiento de los futuros ingenieros y profesionales interesados en esta área.

4.6. IMPLEMENTACIÓN DE LOS SENSORES EN EL MOTOR ISUZU

4.6.1. SENSOR DE TEMPERATURA DEL AGUA (WTS)

El sensor de temperatura del agua del motor (WTS) es una resistencia variable que mide la temperatura del agua del motor, a través de una caída de voltaje producida por el modulo de control.

El módulo de control suministra 5 voltios al WTS y también suministra una tierra o referencia bajo.

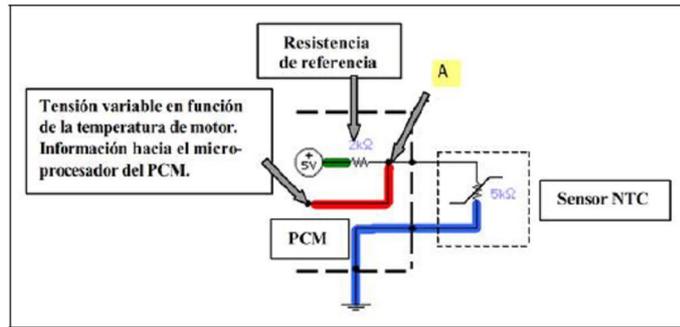


Figura 4.12. Circuito del Sensor de temperatura

Tabla IV.1. Valores de funcionamiento de un sensor WTS

TEMPERATURA °F	TEMPERATURA °C	RESISTENCIA Ω	VOLTAJE V
212	100	160	0.46
176	80	350	0.78
140	60	600	1.33
104	40	1700	2.13
68	20	3400	3.07
50	10	6000	3.51



Figura 4.13. Localización del sensor WTS en el motor Isuzu



Figura 4.14. Conector del sensor

Tabla IV.2 Terminales del sensor WTS

BORNES		
PIN	A	B
SEÑAL	Referencia Baja	Referencia 5 Voltios.

4.6.2. SENSOR DE REVOLUCIONES (CKP)

El sensor de Posición del Cigüeñal (CKP) es el que muestra información al modulo de control sobre las r.p.m., para que pueda calcular y sincronizar el momento de apertura la válvula EGR (motor paso a paso)

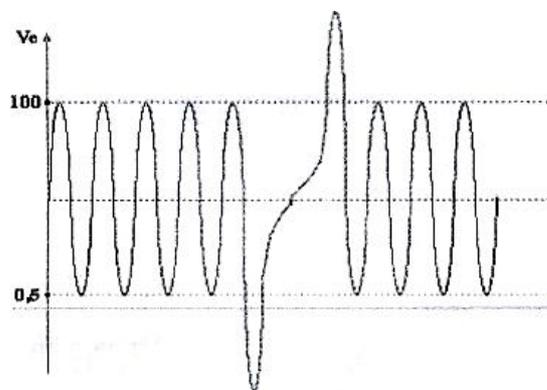


Figura 4.15. Señal de salida del sensor inductivo

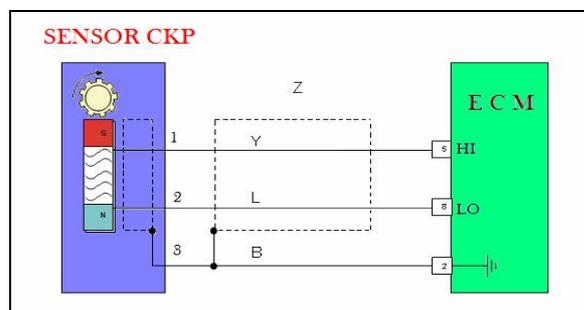


Figura 4.16. Diagrama eléctrico del sensor CKP

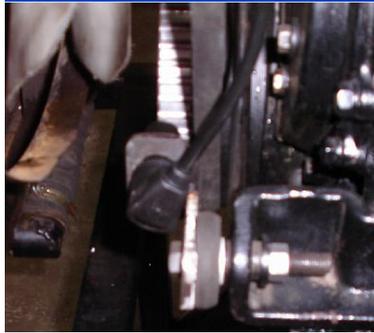


Figura 4.17. Localización del sensor CKP en el motor Isuzu



Figura 4.18. Conector del sensor CKP

Tabla IV.3 Terminales del sensor CKP

	BORNES		
PIN	1	2	3
SEÑAL	Ignición Voltaje	Tierra	Señal

4.6.3. SENSOR DE FLUJO MÁSSICO DE AIRE (MAF)

El medidor de flujo de masa de aire motor incorpora el sensor de temperatura de aire de aspiración y, en este caso, los dos sensores trabajan conjuntamente pero con circuitos separados. En este caso llegan al medidor 5 cables.

El módulo de control proporciona 5 voltios al IAT, mientras que el MAF proporciona un voltaje de 12 voltios, la cual es la señal del circuito además proporciona una tierra única al sensor MAF y al IAT.

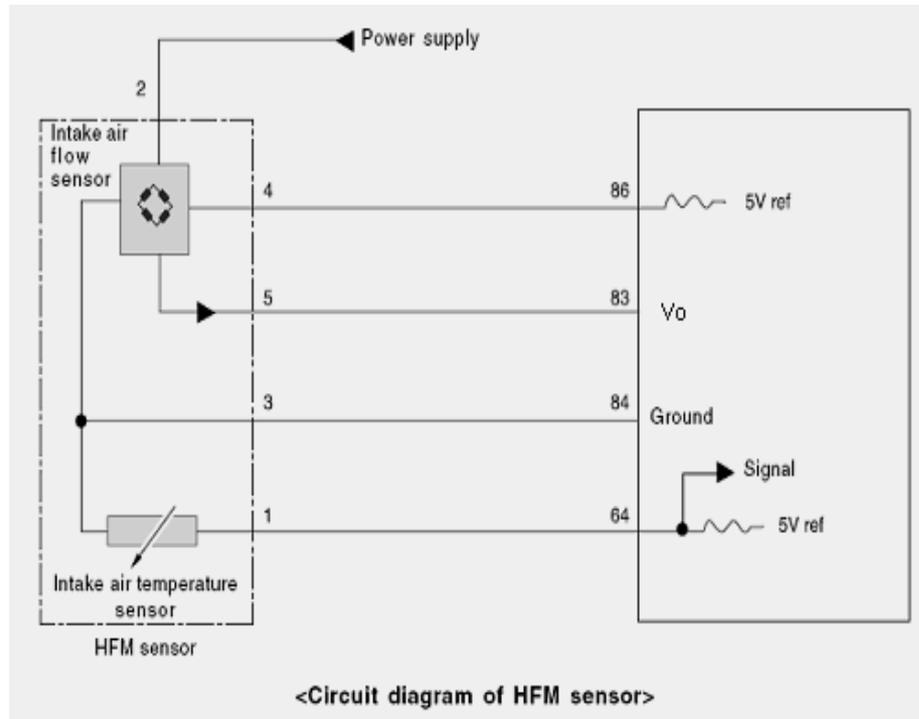


Figura 4.19. Esquema de conexión del Sensor MAF de 5 pines



Figura 4.20. Localización del Sensor MAF en el motor Isuzu



Figura 4.21. Conector del sensor MAF

Tabla IV.4 Terminales del sensor MAF

	BORNES				
PIN	1	2	3	4	5
SEÑAL	Señal	Ignición	Tierra	Referencia	Señal
	IAT	Voltaje		5 Voltios	MAF

4.6.4. SENSOR DE OXÍGENO (EGO)

El Sensor de Oxígeno (EGO) se encuentra localizado en el múltiple de escape antes. Es un dispositivo capaz de medir la relación Lambda de los gases de escape en función de la cantidad de oxígeno que posean. La medida de la sonda Lambda es una señal de voltaje de entre 0 y 1 v.

El sensor de oxígeno está construido de tres placas, dos de platino y una de bióxido de zirconio. El bióxido de zirconio y el platino son materiales electrolíticos que producen un voltaje por medio de reacciones químicas a alta temperatura (arriba de 300 °C), dependiendo del oxígeno existente en cada uno de ellos.

Al estar cada uno de los electrodos de platino en entornos diferentes adquieren cantidades diferentes de iones de oxígeno. De esta manera uno

de ellos queda eléctricamente más cargado que el otro, creando entre ellos una diferencia de voltaje o diferencia de potencial.

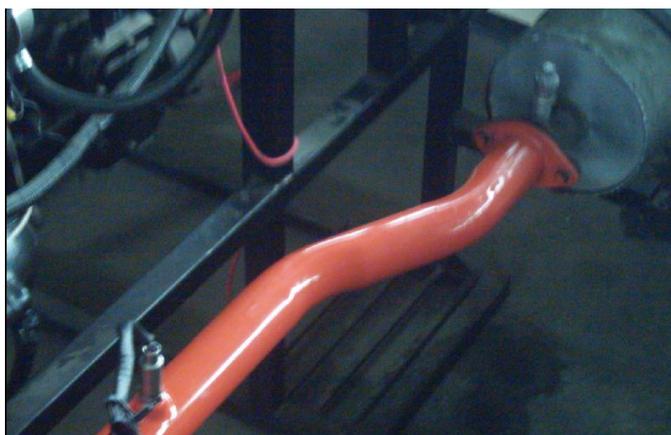


Figura 4.22. Localización del Sensor de Oxígeno en el motor Isuzu

A temperaturas inferiores a 300 °C el sensor se comporta como un circuito abierto (resistencia infinita). A temperaturas mayores de 300 °C la cerámica se transforma en una pila cuya tensión depende de la diferencia de concentración de oxígeno entre los dos electrodos.

Si la concentración de oxígeno en el escape es inferior a 0,3% la tensión es mayor que 0,8V, esto ocurre para factores lambda inferiores a 0,95.

Si la concentración de oxígeno en el escape es mayor que 0,5% la tensión es menor que 0,2V, esto ocurre para factores lambda superiores a 1,05.

El sensor de oxígeno (EGO) consta de cuatro cables, dos para alimentación del calefactor, y otros dos para salida de tensión (señal) y retorno de la misma. En algunos modelos los cables de tensión y retorno están aislados de chasis por medio de una malla, para disminuir la interferencia por ruidos eléctricos.

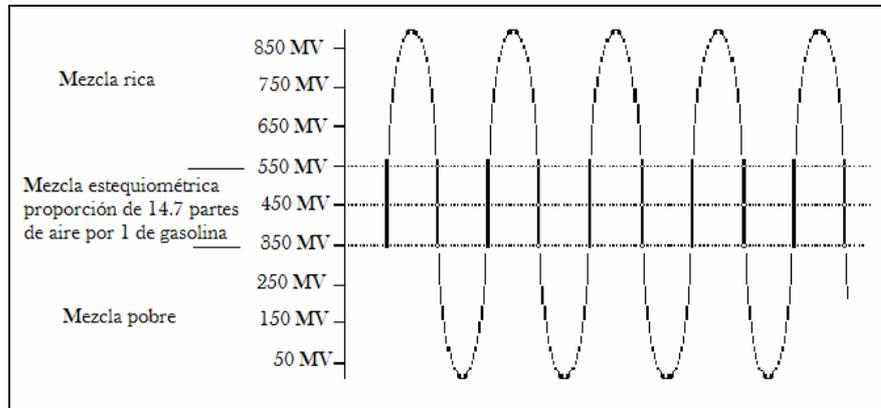


Figura 4.18. Fluctuación del sensor de Oxígeno

Mayor contenido de O_2 será mezcla pobre y el voltaje de referencia será bajo. Una mezcla rica tendrá menos contenido de O_2 y el voltaje de referencia será alto.

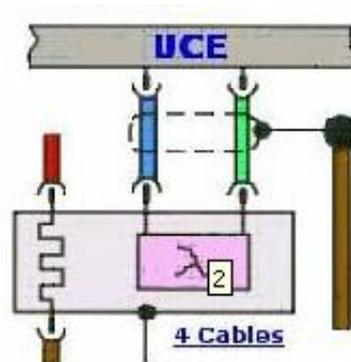


Figura 4.19. Esquema Eléctrico del Sensor de Oxígeno



Figura 4.20. Conector del sensor del oxígeno

Tabla IV.5 Terminales del sensor de oxígeno

BORNES

PIN	1	2	3	4
SEÑAL	Tierra	12 V	Señal	Tierra
	Resistencia	Resistencia		

Tabla IV.6. Señales del sensor del oxígeno

Nombre	Señal
Mezcla Pobre	0 mV
Mezcla Rica	1000 mV
A Trabajo normal	350 – 550 mV.

4.6.5. MOTOR A PASOS

El motor paso a paso en el sistema de recirculación de gases implementado en el motor Isuzu realizará el trabajo de la válvula EGR instalada en los vehículos modernos ya que este motor nos proporciona movimientos muy precisos.

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 0.9°, es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 400 para el segundo caso (0.9°), para completar un giro completo de 360°.

Los motores Paso a Paso son motores en los que podemos controlar el desplazamiento del rotor en función de tensiones que se aplican a las bobinas. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará

enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas. Por lo que podemos conseguir controles de los desplazamientos adelante y detrás y determinado número de pasos por vuelta.

4.6.5.1. Tipos de motores a pasos

Desde el punto de vista constructivo existen tres tipos de motores PaP:

1. De imán permanente

Es el tipo de motores PaP más utilizado, y sus características constructivas son las siguientes:

- El rotor está formado por un imán permanente, en forma de disco, y en cuya superficie se encuentran mecanizados un determinado número de dientes.
- El estator tienen forma cilíndrica, y en su interior se encuentran diversos bobinados, que al ser alimentados secuencialmente generan un campo magnético giratorio.
- Como resultado de las fuerzas de atracción-repulsión, el rotor se orientará dentro de este campo magnético giratorio, lo que provocará su movimiento controlado.
- La conmutación en la alimentación de las bobinas tiene que ser manejada por un controlador externamente.

2. De reluctancia variable

En este caso:

- El estator es similar al caso anterior.

- El rotor no es un imán permanente, sino que está formado por un núcleo de hierro dulce, e igualmente con dientes tallados a lo largo de su superficie.

- En este tipo de motor, al alimentar una de las bobinas del estator, se crea un campo magnético. En estas condiciones, el rotor se orienta hacia aquella posición en la que la reluctancia que presenta el circuito es mínima. Esta posición será aquella en la que el entrehierro sea el más pequeño posible. Al cambiar la alimentación a otra de las bobinas, el punto de mínima reluctancia también cambia, con lo cual el rotor gira de nuevo.

3. Híbridos

Este tipo de motores son una mezcla de los dos anteriores. El rotor está formado por una serie de anillos de acero dulce que tienen en su superficie un nº de dientes ligeramente distinto a los del estator. Dichos anillos están montados sobre un eje que es un imán permanente.

4.6.5.2. Selección del Motor Paso a Paso

Para el desarrollo del proyecto hemos utilizado un motor de imán permanente unipolar ya que en este caso el estator está formado por dos bobinas con tomas intermedias, lo que equivale a cuatro bobinas. Las tomas intermedias de las dos bobinas pueden

estar interconectadas en el interior o no. Externamente se apreciarán cinco conductores en el primer caso, y seis en el segundo. La forma de alimentar este motor consiste en poner a masa la toma central e ir aplicando según una secuencia determinada pulsos de valor +V a un extremo de la bobina y al otro (nunca simultáneamente). De tal manera que la intensidad que circula por cada media bobina siempre lo hace en el mismo sentido, por eso se denominan unipolares. Otra posibilidad de alimentación, consiste en dejar fija en la toma intermedia una tensión +V, e ir alternando en ambos extremos la conexión con masa.

Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interno. Este tipo se caracteriza por ser más simple de controlar y las entradas de activación (Activa A, B, C y D) pueden ser directamente activadas por un microcontrolador.

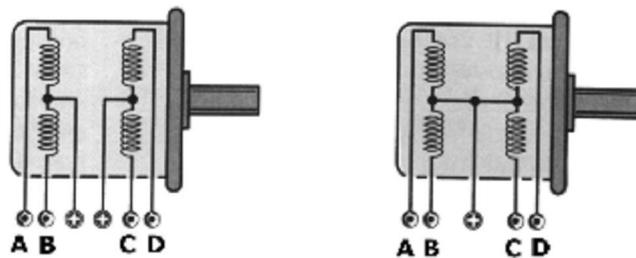


Figura 4.26. Motor paso a paso unipolar

Tabla IV.7. Secuencia de excitación de bobinas para el funcionamiento de un motor unipolar en modo paso completo.

Paso	COMÚN	A	B	C	D
1	Masa	+V ó 1	0	+V ó 1	0
2	Masa	0	+V ó 1	+V ó 1	0
3	Masa	0	+V ó 1	0	+V ó 1
4	Masa	+V ó 1	0	0	+V ó 1

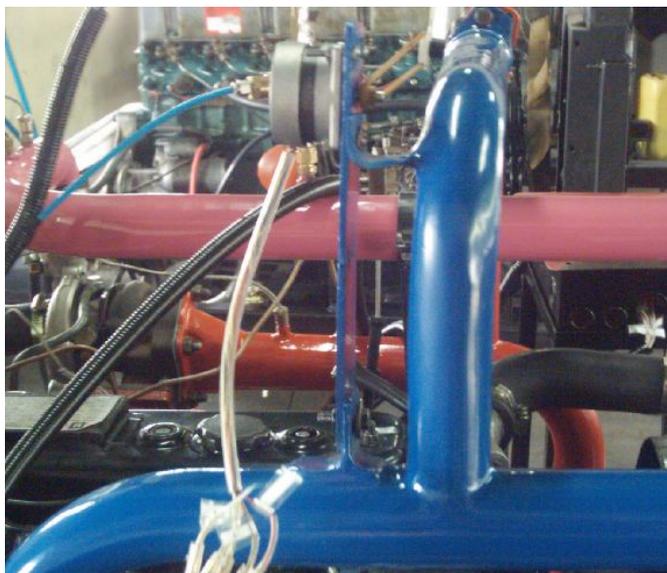


Figura 4.27. Instalación del motor a pasos en el motor Isuzu 4BD1T

4.7. VÁLVULA BYPASS

Esta válvula bypass simula el funcionamiento de la válvula EGR instalada en los vehículos; es decir que nos permitirá el paso de los gases de escape por medio del ángulo del giro o apertura de la mariposa.

La apertura de la válvula es controlada mediante la activación del motor paso a paso. El sistema de apertura de la válvula consta de una banda dentada y una polea dentada. Los grados de apertura de la válvula dependerán de los grados que gire el motor paso a paso.

Para la instalación de esta válvula bypass en el motor Isuzu se diseñó un sistema de tubería tanto para la instalación de la válvula como para el paso de los gases de escape. La válvula se encuentra en el recorrido de esta tubería permitiendo la apertura o el cierre para el paso de los gases.



Figura 4.28. Localización Válvula Bypass



Figura 4.29. Sistema de activación de la Válvula Bypass

4.8. DISEÑO DEL PROGRAMA Y MÓDULO DE CONTROL DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE

El avance tecnológico en los automóviles a diesel ha creado la necesidad de ampliar los conocimientos a fin de garantizar a la industria automotriz tecnología de punta. La utilización de la sobrealimentación, se fundamenta en la mejora de la combustión del motor debido a un mayor llenado de aire en los cilindros, lo que provoca un aumento de potencia, un menor consumo específico y una menor contaminación.

El propósito de la investigación planteada es por la necesidad imperiosa de evitar la contaminación de las ciudades por medio de los vehículos automotrices. Por lo que en la actualidad se ha optado como solución la implantación de un sistema de recirculación de gases en los vehículos.

Adicionalmente es importante por que se genera en forma complementaria un programa de entrenamiento, para que los docentes, los estudiantes, profesionales, técnicos y mecánicos interesados en comprender el funcionamiento de estos sistemas.

4.8.1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

El programa de entrenamiento de este proyecto debe ajustarse a parámetros de aplicación y funcionalidad, entre los más relevantes tenemos:

- El módulo de control del sistema va a ser de fácil manejo ya que presenta versatilidad en su conexión, puesto que los conectores de los sensores y del motor paso a paso van a ser visibles y a estar ubicados en un lugar de fácil conexión.
- El control y funcionamiento de los diferentes sensores instalados en el motor Isuzu.
- Disponer del control de un microprocesador a través del ingreso por medio de un teclado de los diferentes parámetros de intervención para la activación del motor paso a paso.
- Las condiciones de activación del motor paso a paso van a basarse a las que necesita una válvula EGR para funcionamiento.

- Variar los grados de apertura de la válvula bypass por medio del ingreso del número de pasos a través del teclado instalado en el módulo.

4.8.2. PARÁMETROS Y SEÑALES CONSIDERADAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA

4.8.2.1. Ingreso de señales y su procesamiento

Para el ingreso de las señales se utilizara un teclado por medio del cual se calibran los datos para la activación de la válvula. Estas señales serán comparadas para verificar si se encuentran dentro de los rangos de calibración, para luego ser procesadas y llegar al PIC de ingreso, para que este se encargue de enviar la señal para la activación del motor paso a paso.

Cuando las señales llegan al PIC este las procesa y envía los datos que captan los diferentes sensores instalados en el motor, para luego ser desplegados en la pantalla Lcd.

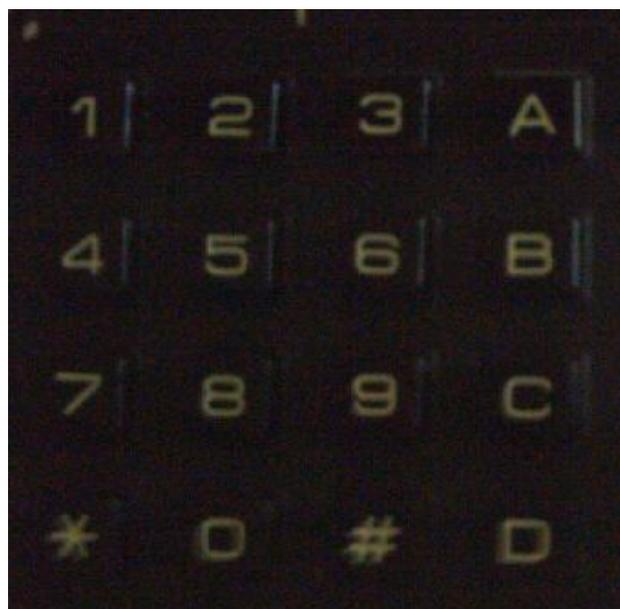


Figura 4.30. Proceso de ingreso de señales

4.8.2.2. Señales de operación

Para el ingreso de las señales de operación se realizará a través del teclado que funciona como interfase entre el usuario y el programa. Se podrá calibrar los datos de activación pero deben mantenerse dentro del rango permitido para su funcionamiento.

Tabla IV.8. Valores de entrada al PIC

DATOS	VALORES DE CALIBRACIÓN
Temperatura del aire	Mín. 15 °C Máx. 60 °C
Temperatura del agua	Mín. 20 °C Máx. 120 °C
Revoluciones el motor	Mín. 500 rpm Máx. 900 rpm
Número de pasos	1 - 50

4.9. SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

4.9.1. SELECCIÓN DEL PIC 16F877

Por poseer varias características que hacen que el microcontrolador sea un dispositivo muy versátil, eficiente y práctico se empleará el modelo 16F877A para el desarrollo del proyecto.

Se selecciono este microcontrolador porque posee una amplia memoria para datos y programa, además de que existe una gran cantidad

de información y se agrega también la facilidad de programación que posee.

4.9.1.1. Características

Las principales características que cuenta el PIC16F87X son:

Tabla IV.9. Características del PIC 16F877

CARACTERÍSTICAS	16F877
CPU	Risc
Frecuencia máxima	DX-20MHZ
Voltaje de operación	4.0 – 5.5V.
Memoria no volátil:	14.3 Kbytes (8192 palabras)
Memoria de datos SRAM	368 bytes
Memoria de datos EEPROM	256 bytes
Memoria de programa de 14 bits	8 Kbytes
Puertos E/S	A, B, C, D
Número de pines	40
Interrupciones	14
Timers	3
Módulos CCP	2
Comunicaciones Serie	MSSP, USART
Comunicaciones paralelo	PSP
Líneas de entrada de CAD de 10 bits	8
Longitud de instrucciones	14 bits
Arquitectura	Harward
Niveles de pila	8

Perro guardián (WDT)	1
Oscilador	RC

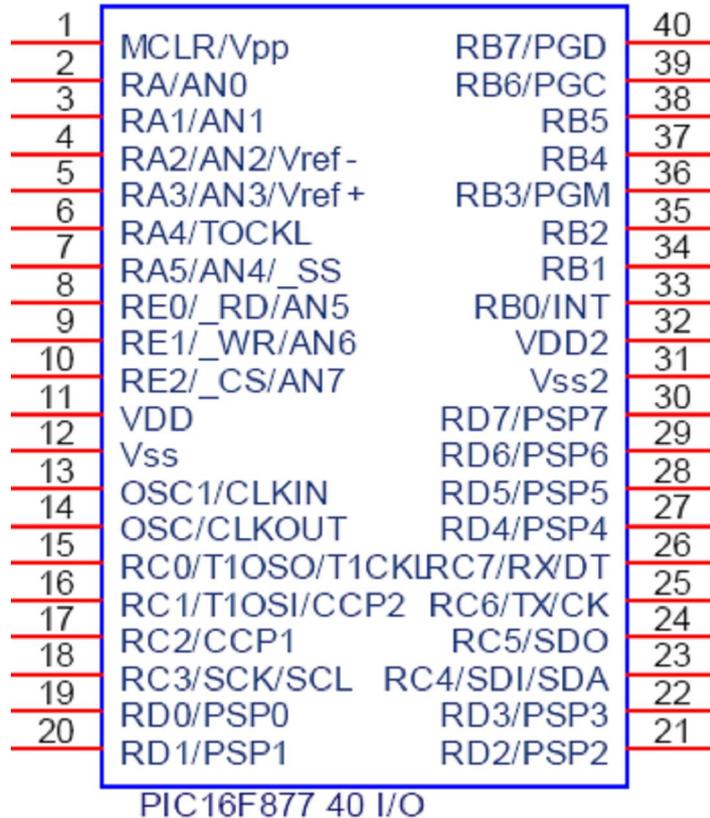


Figura 4.31. PIC 16F877A

4.10. SELECCIÓN DE ELEMENTOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

Para la selección de los elementos eléctricos y electrónicos debemos considerar la función y los parámetros que van a cumplir cada uno de estos en el diseño del circuito para un funcionamiento eficiente.

4.10.1. REGULADOR DE VOLTAJE

Para la utilización de la mayoría de circuitos integrados y sensores se requiere un voltaje de 5V para la parte de alimentación del sistema de control, para lo cual debemos regular el voltaje obtenido de una batería de

12V utilizada solamente en el momento de la utilización del módulo de entrenamiento.

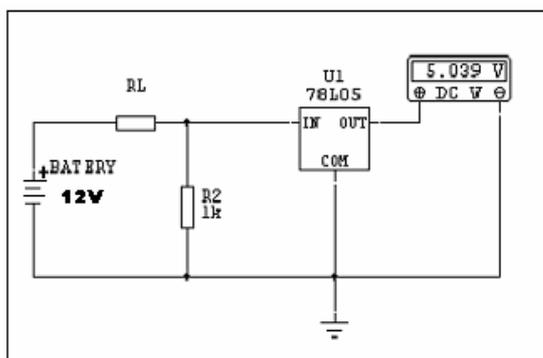


Figura 4.32. Circuito de regulación de Voltaje

$$V_{IN} = 5V + 1.15$$

$$V_{IN} = 6.15$$

$$I_{1K} = \frac{V_{IN}}{1k} = \frac{6.15}{1k}$$

$$I_{1K} = 6.15\text{mA}$$

$$V_L = 12V - V_{IN}$$

$$V_L = 5.85\text{ V}$$

$$I_L = I_{1k}$$

$$R_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{5.85}{6.15} \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 0.95 \text{ k}\Omega$$

$$P_L = 5.85 \times 6.15 \text{ mW}$$

$$P_L = 0.035 \text{ W}$$

$$P_{1k} = 6.15^2 \text{ mW}$$

$$= 0.037 \text{ W}$$

Según los cálculos y los resultados obtenidos con la utilización del regulador de voltaje 78L05 debemos completar el circuito utilizando resistores de 1 kΩ.

4.11. DISEÑO DEL DIAGRAMA ELECTRÓNICO

A continuación se muestra el diagrama del circuito general y los elementos seleccionados para su diseño.

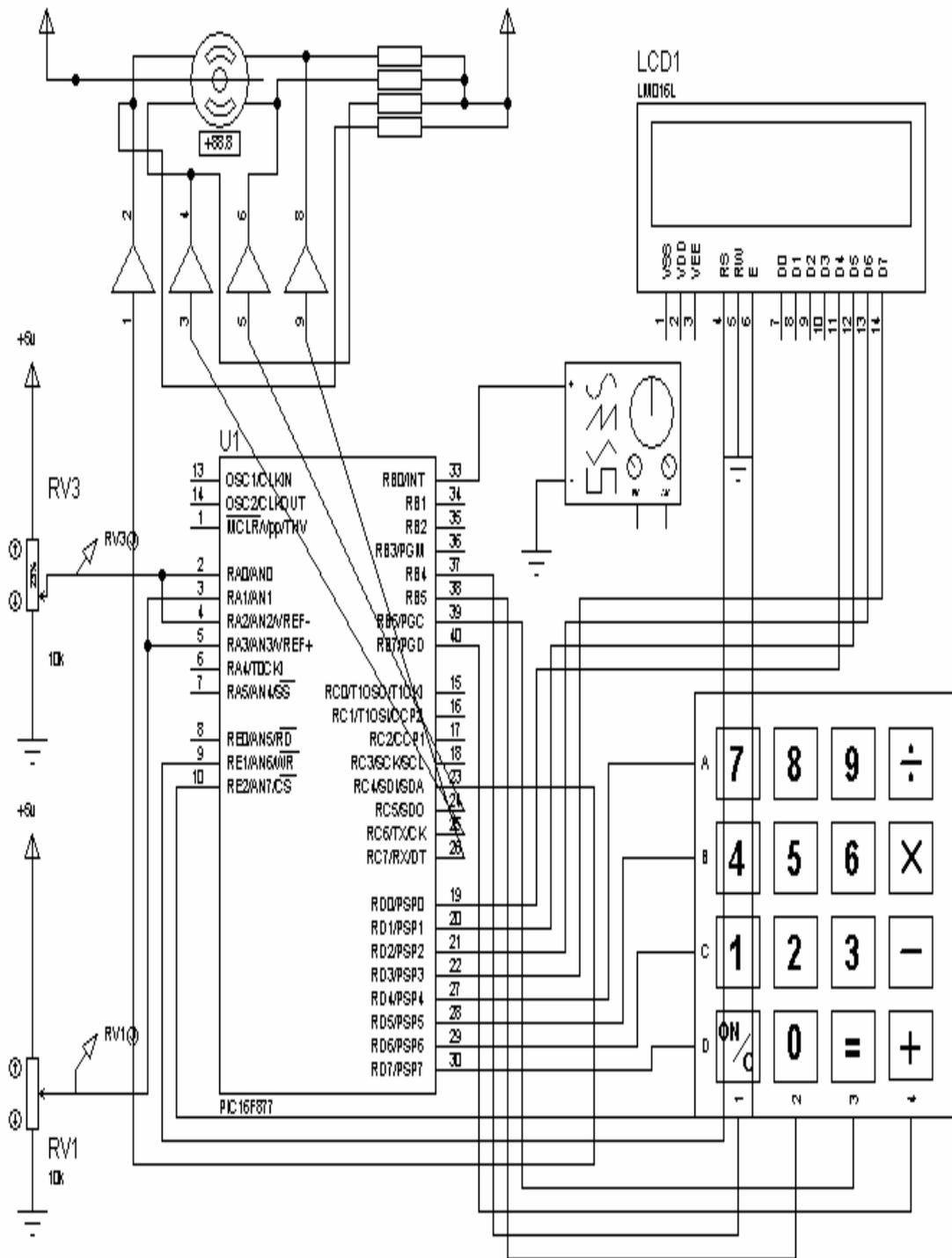


Figura 4.33. Circuito Electrónico de la aplicación

4.12. SELECCIÓN DE COMPONENTES

El módulo de control posee los siguientes componentes:

Tabla IV.10. Elementos utilizados en el módulo de control

Cant.	Componente	Valor
01	Resistencias	10 K Ω
07	Resistencias	2 K Ω
02	Resistencias	1 K Ω
01	Resistencias	680 Ω
01	Resistencias	560 Ω
01	Resistencias	270 Ω
04	Resistencias	220 Ω
20	Diodos	4007
01	PIC	16F877A
01	Regulador	78L05
02	Reguladores	78120
01	Condensador	1 μ F
03	Condensadores	10 μ F
02	Condensadores	0.1 μ F
02	Condensadores	18 μ F
02	Condensadores	2200 μ F
02	Fusibles-Portafusibles.	10 A
01	Cristal-Oscilador	4 MHz
04	TIP 122	s/n

07	1N4004	s/n
03	Bornera 3H	s/n
04	Bornera 2H	s/n
05	SIP 8	s/n
01	SIP 4	s/n
01	LM 7812	s/n
01	LM 7805	s/n

4.13. DESCRIPCIÓN DE OPERACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES DEL MÓDULO DE CONTROL

4.13.1. PIC 16F877A

El microcontrolador es el encargado de recibir los datos ingresados por medio del teclado para procesarlos y activar las salidas logrando la activación del motor paso a paso.

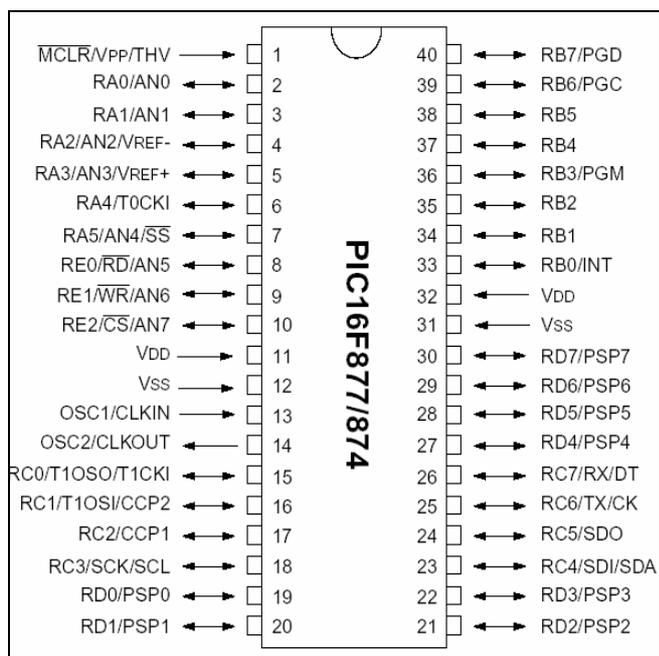


Figura 4.34. PIC 16F877A

4.13.2. MOTOR A PASOS

El motor paso a paso es el que mediante su activación permitirá la rotación de la mariposa de la válvula bypass, para permitir el paso de los gases de escape.



Figura 4.35. Motor a pasos

4.14. ANÁLISIS ECONÓMICO

Concluido la selección de elementos y componentes mecánicos eléctricos y electrónicos se presenta una tabla de costos de cada uno de ellos.

Tabla IV.11. Componentes y costos de la placa de acoplamiento de señales

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNI	SUBTOTAL
TARJETA ACOPLAMIENTO DE SEÑALES			
BAQUELITA 6,3cm X 4,5cm	1	16	16
BORNERAS 3H	6	0,35	2,1
BORNERAS 2H	1	0,25	0,25
BASE 8 PINES	3	0,15	0,45
RESISTENCIAS 1/4 W 2K	3	0,04	0,12
RESISTENCIAS 1/4 W 1K	1	0,04	0,04
RESISTENCIAS 1/4 W 560	1	0,04	0,04
LM358	2	0,8	1,6
4N25	1	0,6	0,6

Tabla IV.13. Componentes y costos de la placa de voltaje y control motor a pasos

TARJETA FUENTE DE VOLTAJE Y CONTROL MOTOR A PASOS			
BAQUELITA 8,2cm X 7,1cm	1	16	16
BORNERA 3H	3	0,35	1,05
BORNERA 2H	2	0,25	0,5
TIP 122	4	1,2	4,8
1N4004	7	0,1	0,7
CONDENSADOR 2200uf/25v	2	0,45	0,9
CONDENSADOR 0.1uf/50v	1	0,1	0,1
CONDENSADOR 10uf/25v	2	0,1	0,2
CONDENSADOR 1uf/50v	1	0,1	0,1
LM7812	1	0,65	0,65
LM7805	1	0,55	0,55
LED ROJO	1	0,1	0,1
FUSIBLE	2	0,05	0,1
RESISTENCIAS 1/4 W 2K	4	0,04	0,16
RESISTENCIAS 1/4 W 270	1	0,04	0,04

Tabla IV.14. Componentes y costos de la placa del control del PIC

TARJETA CONTROL PIC			
BAQUELITA 7,6cm X 6,1cm	1	16	16
SIP 8	5	0,75	3,75
SIP 4	1	0,55	0,55
BORNERA 2H	2	0,25	0,5
BASE 40	1	0,4	0,4
LED VERDE	1	0,1	0,1

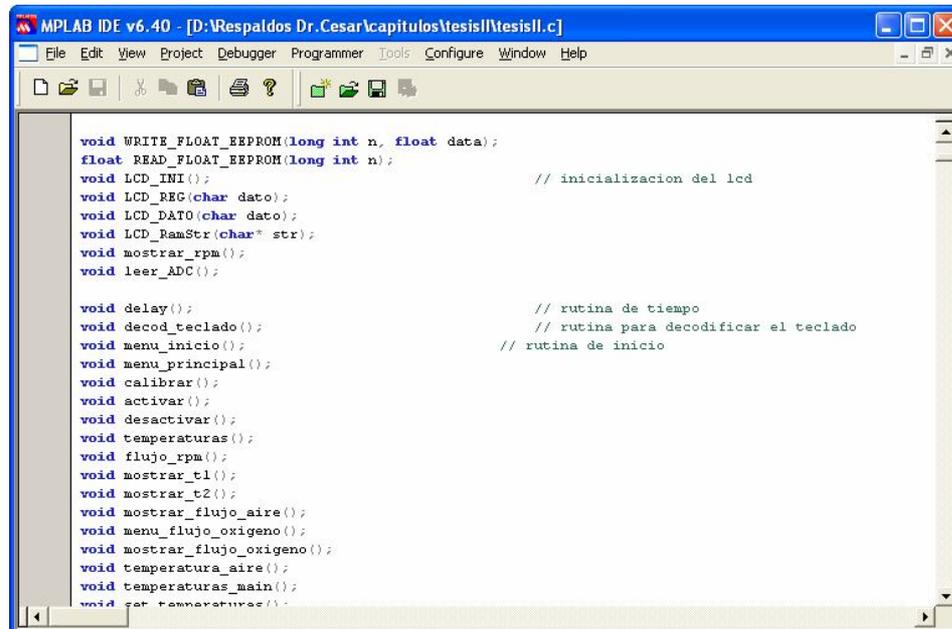
PIC 16F877A	1	14	14
CONDENSADOR 18pf	2	0,15	0,3
CONDENSADOR 0.1uf/50v	1	0,1	0,1
CONDENSADOR 10uf/50v	1	0,1	0,1
RESISTENCIAS 1/4 W 220	4	0,04	0,16
RESISTENCIAS 1/4 W 680	1	0,04	0,04
RESISTENCIAS 1/4 W 1K	1	0,04	0,04
RESISTENCIAS 1/4 W 10K	1	0,04	0,04
CRISTAL 4Mhz	1	1,5	1,5
LCD 16x2 CON BACK LIGHT	1	14	14
TECLADO 4x4	1	9,5	9,5
MOTOR A PASOS	1	13	13
CINTA RIBBON	1	2,5	2,5
		TOTAL	123.73

El costo total del diseño y construcción del módulo de entrenamiento sería alrededor de los 123.73 USD a lo cual debemos añadir el costo de 900 USD de los sensores, reparación de la bomba de inyección, del turbo, compra del intercooler e implementación de otros materiales utilizados para el diseño del proyecto lo que nos da un total de 1023.73 USD.

4.15. INSTALACIÓN Y PRUEBAS DE OPERACIÓN EN EL PROTO-BOARD

4.15.1. PROGRAMACIÓN Y QUEMADO DEL PIC

El programa del PIC fue realizado en Lenguaje C++ que luego fue compilado con assembler al MPLAB el cual probamos en el programa PROTEUS, este software nos ayuda a simular el funcionamiento del PIC.



```
void WRITE_FLOAT_EEPROM(long int n, float data);
float READ_FLOAT_EEPROM(long int n);
void LCD_INI(); // inicializacion del lcd
void LCD_REC(char dato);
void LCD_DATO(char dato);
void LCD_RamStr(char* str);
void mostrar_rpm();
void leer_ADC();

void delay(); // rutina de tiempo
void decod_teclado(); // rutina para decodificar el teclado
void menu_inicio(); // rutina de inicio
void menu_principal();
void calibrar();
void activar();
void desactivar();
void temperaturas();
void flujo_rpm();
void mostrar_t1();
void mostrar_t2();
void mostrar_flujo_aire();
void menu_flujo_oxigeno();
void mostrar_flujo_oxigeno();
void temperatura_aire();
void temperaturas_main();
void get_temperaturas();
```

Figura 4.36. Programa del PIC

Una vez realizada todas las pruebas en el simulador, procedemos a quemar el PIC para lo cual utilizamos el software IC-PROG el cual se encarga de transferir toda la información del programa hacia el PIC, mediante la utilización de un quemador universal.



Figura 4.37. Quemador universal del PIC

4.15.2. ARMADO Y PRUEBAS DEL CIRCUITO EN EL PROTO-BOARD

Con la obtención de todos los elementos electrónicos procedemos a realizar el armado del circuito en un PROTO-BOARD para comprobar su funcionamiento y corregir errores si existieran.

La simulación de los sensores en el proto-board se la realiza con la ayuda de potenciómetros para variar el valor de su funcionamiento siendo los leds los que nos indicaran cuando llegue a estar dentro del rango de funcionamiento, además del PIC que se debe encontrar ya debidamente quemado con el programa correspondiente y los diferentes elementos seleccionados para el circuito electrónico.

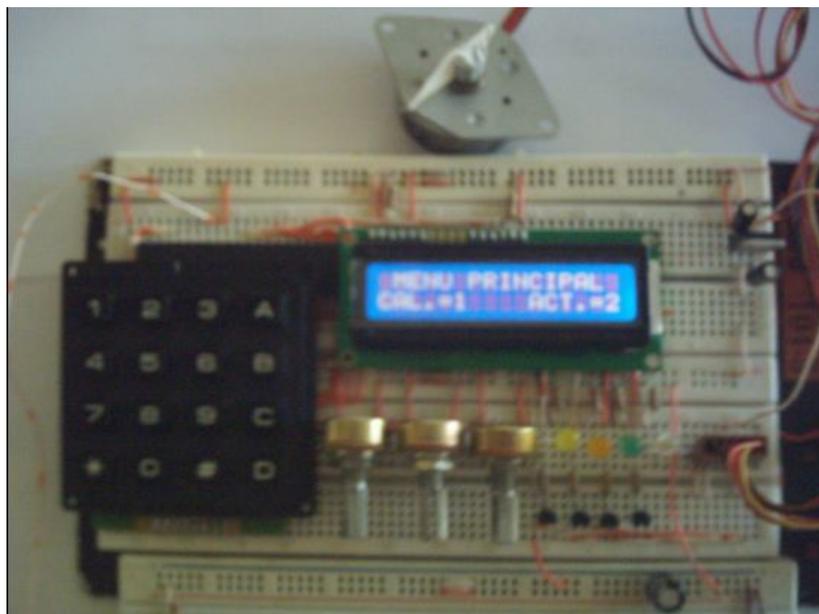


Figura 4.38. Armado del circuito de prueba en el proto-board

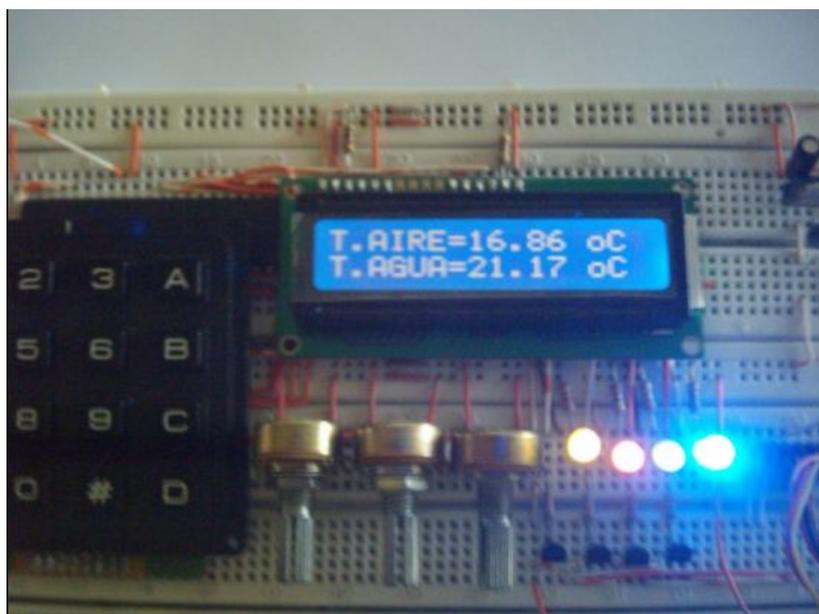


Figura 4.39. Pruebas en el proto-board

4.15.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PLACAS

Para el diseño de las placas diferentes placas, reconocemos el espacio físico en el que se han de colocar las distintas placas, para el proyecto disponemos de una caja metálica de 30 cm. x 40 cm. Por tal motivo se diseño una placa de acoplamiento de señales de 6,3 cm X 4,5 cm, una placa de fuente de voltaje y control motor a pasos 8,2 cm X 7,1 cm; y una placa de control de PIC de 7,6 cm X 6,1 cm.

Con la ayuda del software CIRCUIT MAKER diseñamos el plano del circuito electrónico, evitando el cruce de líneas de cada elemento de la siguiente manera:

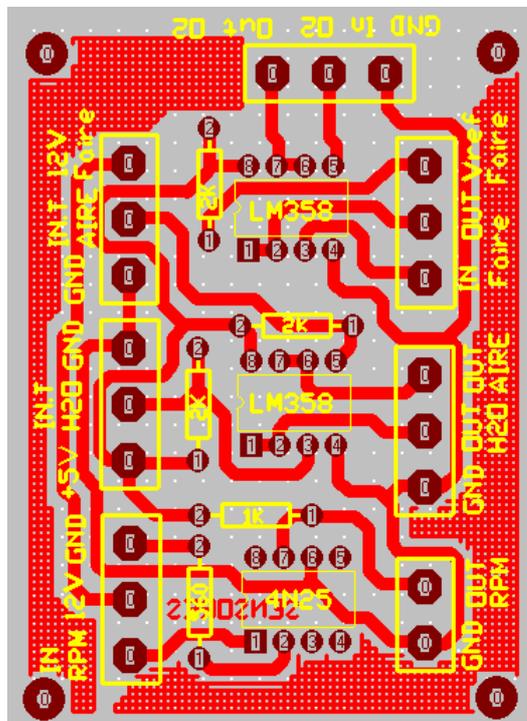


Figura 4.40. Placa de acoplamiento de señales

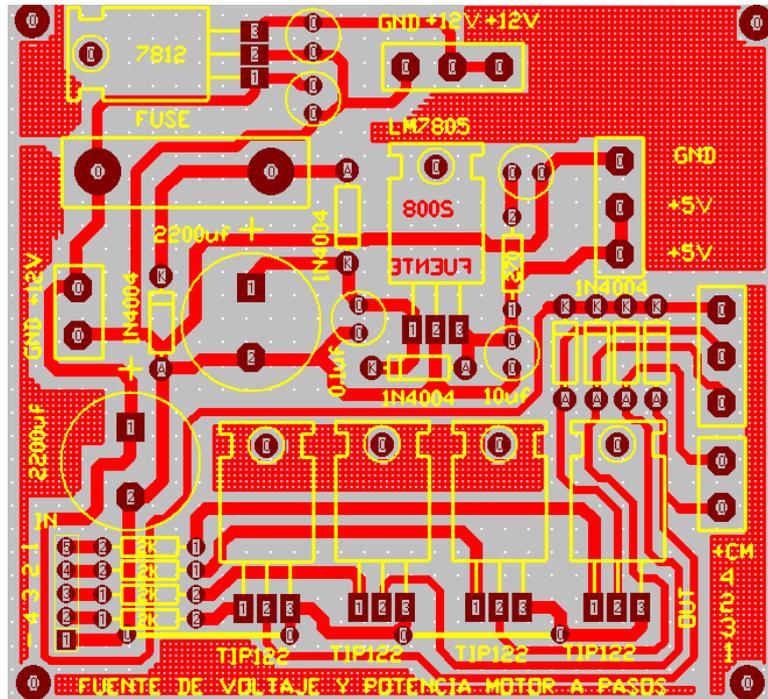


Figura 4.41. Placa de fuente de voltaje y potencia motor a pasos

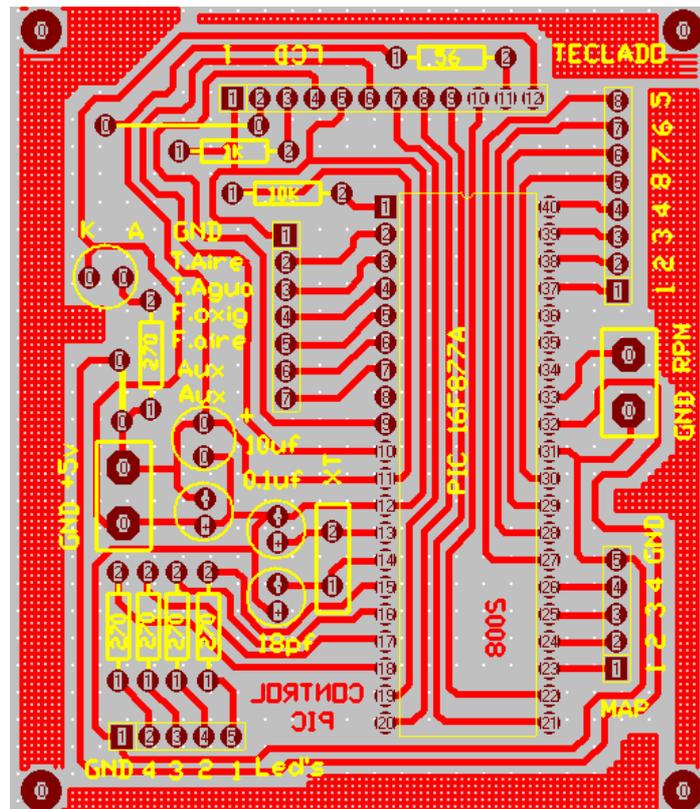


Figura 4.42. Placa de control de PIC

Luego se imprime los diseños en papel satinado para proceder a transmitir los circuitos a la placa de cobre. De ahí colocamos la placa en la mezcla de proporción adecuada de cloruro férrico y agua tibia, dejando reposar por unos minutos hasta observar que solo queden los circuitos deseados en la placa.

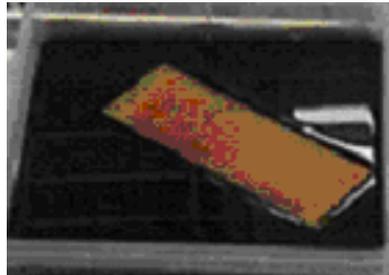


Figura 4.43. Inmersión de las placas

Dejar secar las placas durante un día, para iniciar el perforado y soldado del resto de elementos.

Después procedemos a soldar los elementos electrónicos a las placas, probar la correcta continuidad de las placas y realizar las pruebas para verificar su funcionamiento y los caminos de los circuitos.



Figura 4.44. Soldado de las placas

V. INSTALACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE EN EL MOTOR ISUZU 4BD1T

5.1. MONTAJE E INSTALACIÓN.

5.1.1. INSTALACIÓN DEL MÓDULO EN LA CAJA METÁLICA

Al terminar todo el proceso de diseño y armado de las placas electrónicas, verificamos el espacio que vamos a utilizar para la ubicación de todos los componentes del módulo dentro de la caja metálica, de tal manera que nos permita tener una mayor accesibilidad y facilidad para realizar la instalaciones del cableado y del control de su funcionamiento.



Figura 5.1. Caja metálica para la instalación del módulo

Una vez determinada la ubicación de cada una de las placas en el soporte, procedemos con la instalación del mismo dentro de la caja. En el soporte se han colocado las placas de acuerdo a la forma de conexión que existen entre cada una; como soporte para las placas se utilizó una plancha de madera de 28.5 x 19.5 cm, la cual nos permitirá evitar el

contacto de los elementos electrónicos con la superficie de la caja metálica para evitar exista algún corto circuito en estas, así mismo cada placa a de ir empernada a la plancha para mayor seguridad.

Además de las placas también podemos encontrar dos borneras las cuales nos facilitarán el acople de los cables, una de ellas nos permite el acople de los distintos sensores con el PIC; y la otra es para el acople del motor paso a paso.

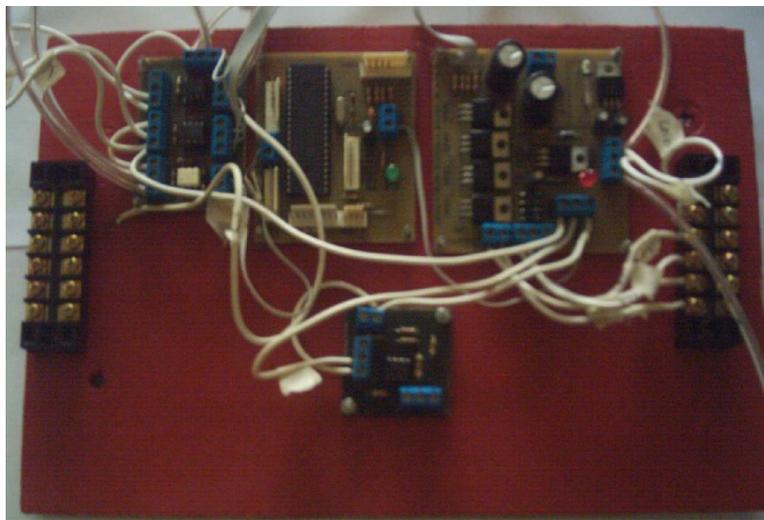


Figura 5.2. Ubicación de las placas en el soporte

Después de instalar todos los elementos en el soporte, realizamos la sujeción de esta a la caja metálica mediante dos pernos colocado en sus extremos.

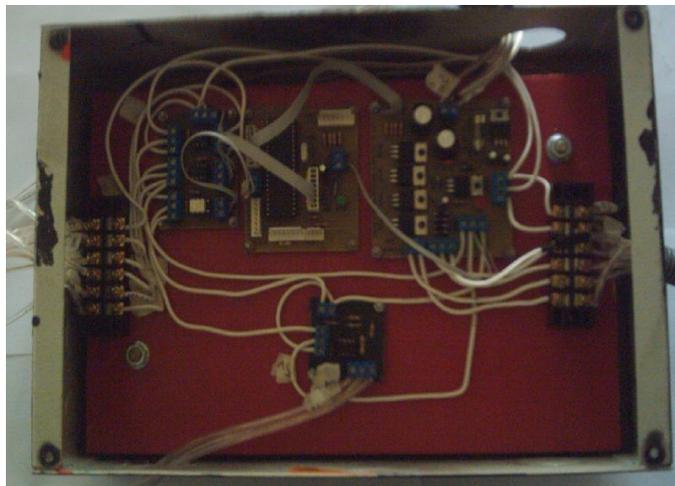


Figura 5.3. Montaje de las placas en la caja metálica

Terminado esto realizamos los adecuamientos necesarios en la tapa de la caja metálica para ubicación de los otros elementos como son el teclado, la pantalla LCD y los leds indicadores.



Figura 5.4. Tapa de la caja metálica

5.1.2. CABLEADO DE LOS SENSORES Y DEL MOTOR PASO A PASO

Para el cableado de los sensores y del motor a pasos instalados en el motor Isuzu 4BD1T, procedemos a medir la distancia que existe entre el lugar donde se encuentran los sensores y el motor a pasos hasta donde se colocará el módulo, para lo cual se utilizó 20m de cable gemelo transparente número 18.

El cableado para cada uno de los sensores y del motor a pasos se lo realizó cuidadosamente evitando el cruce de alambres para no ocasionar problemas en la recepción de señales. Para protección del mismo se lo recubrió con manguera corrugada, la cual nos servirá como protección para evitar que sea manipulado por otras personas.



Figura 5.5. Cableado de los sensores y del motor a pasos

Las dos borneras colocadas a los extremo del soporte nos permitirán realizar con mayor facilidad las conexiones de los sensores y del motor a pasos sin ninguna complejidad ya que se las ha dividido adecuadamente. Proporcionándonos una mayor comodidad para el trabajo ya que no llegan a estar en contacto directo.



Figura 5.6. Borneras: a) sensores, b) motor a pasos

Terminado de realizar todo el cableado, empezamos a identificar cada uno de los pines de los sensores y del motor a pasos para proceder a realizar las conexiones en el módulo y evitar equivocaciones al momento de armar los circuitos.



Figura 5.7. Conector del motor a pasos

Hay que tener mucho cuidado, ya que cada uno de los pines de los sensores identificados anteriormente deben ir conectados correctamente para evitar que la recepción de señales que envían los sensores sean incorrectas o erróneas.

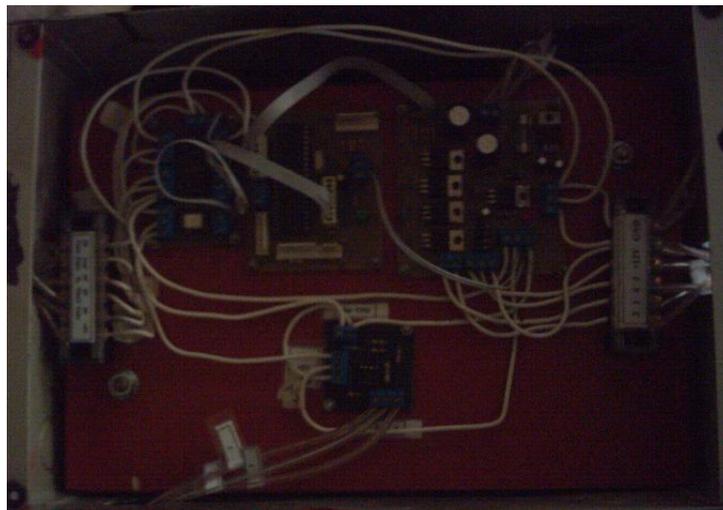


Figura 5.8. Sensores y motor a pasos conectados a las borneras

Para mayor disposición de manejo y conexión, se ha colocado en todos los cables, borneras y conectores los respectivos nombres, lo que nos permitirá identificar con mayor facilidad el lugar de su conexión dentro del módulo.



Figura 5.9. Conexiones de los sensores y del motor a pasos

Además el módulo posee su respectiva conexión para la batería de 12V en donde se encuentra un interruptor de encendido. Igualmente este se encuentra con sus respectivos nombres para evitar una conexión incorrecta al momento de energizar el módulo.



Figura 5.10. Conexión para la batería

5.1.3. PRUEBAS DEL MÓDULO

Terminado de realizar todas las conexiones de los sensores, motor a pasos y de las placas del módulo, iniciamos las pruebas para verificar y observar que funcione correctamente el sistema.

Antes de empezar a comprobar el funcionamiento del módulo, encendemos el motor Isuzu 4BD1T para que los sensores empiecen a captar las variaciones tanto de temperatura como de revoluciones que existirá en el motor. Ya que el módulo necesita recibir y comparar las distintas señales que mandan los sensores instalados en dicho motor.

Ademas verificamos que todos los terminales de los sensores y del motor a pasos estén conectados adecuadamente para evitar errores al momento de su funcionamiento.



Figura 5.11. Conexión del motor a pasos

Verificado esto procedemos a energizar el módulo con una batería de 12V, para después mediante el interruptor de encendido activar el módulo y realizar todas las pruebas respectivas.



Figura 5.12. Instalación del módulo

Para comenzar con las pruebas, procedemos mediante el teclado instalado en el módulo a ingresar todos los datos de calibración necesarios para el funcionamiento, los mismos que nos permitirán verificar que el módulo está trabajando correctamente y llegue a activar el motor a pasos haciendo girar la válvula bypass.



Figura 5.13. Calibración de los sensores

Después de realizado esto observamos que el módulo funciona satisfactoriamente, por lo cual procedemos a su instalación definitiva.

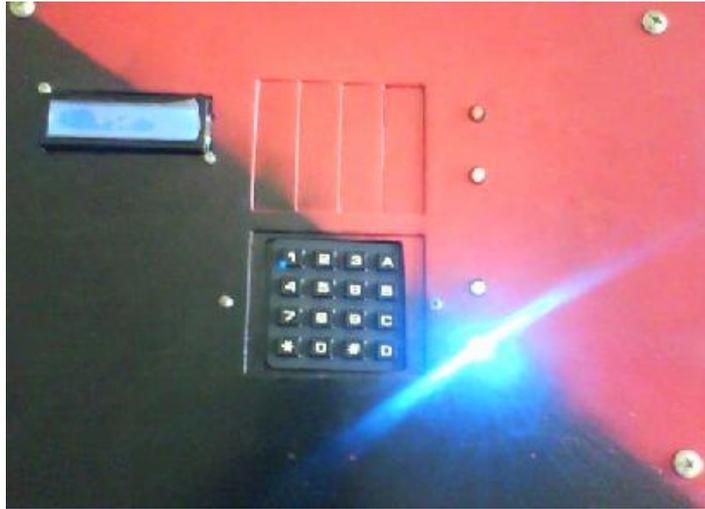


Figura 5.14. Funcionamiento de prueba del módulo

Una vez verificado el correcto funcionamiento del módulo, realizamos la instalación definitiva de todos los elementos, conectamos y verificamos que todos los cables estén correctamente asegurados a sus borneras.



Figura 5.15. Instalación definitiva del modulo

Terminado todas las instalaciones en el módulo volvemos a verificar que funcione correctamente.



Figura 5.16. Control de funcionamiento del módulo

5.2. UTILIZACIÓN DEL MÓDULO

El manejo de este módulo de control es sumamente muy sencillo, ya que en la pantalla Lcd nos presenta instrucciones que nos ayudan para su utilización.

El módulo de control nos presenta un menú principal el cual se subdivide en dos partes, una es la parte de calibración ya sea de los sensores como del motor a pasos; y la otra parte es la de activación en la que nos permite observar como varían los valores que captan los distintos sensores.



Figura 5.17. Menú principal

5.2.1. ENCENDIDO DEL MÓDULO

El módulo trabaja con una batería de 12V, para encender el módulo se debe activar el interruptor principal de encendido de tal manera que al activarlo este se encienda y se puede observar la pantalla con el menú principal.



Figura 5.18. Interruptor de encendido (Posición ON)



Figura 5.19. Interruptor de encendido (Posición OFF)

5.2.2. PROTECCIÓN DEL MÓDULO

Para evitar que existan daños por conexiones erróneas al encender el módulo, se le ha colocado un fusible como protección del sistema, para impedir así que los distintos elementos que conforman el módulo sufran algún daño.

Este fusible se encuentra colocado en la placa de fuente de voltaje y potencia ya que esta es la encargada de alimentar a las demás circuitos existentes en el sistema. El fusible funcionará como protección del módulo ya que si se comete un error al momento de conectar su alimentación, este se quemará evitando así el paso de corriente a los circuitos, para impedir daños de los elementos eléctricos y electrónicos.

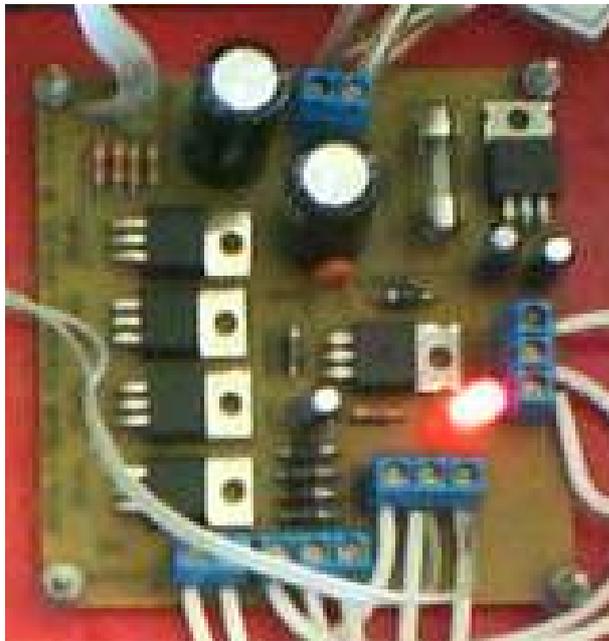


Figura 5.20. Protección del módulo

5.2.3. MODO CALIBRACIÓN

Al encender el módulo, en la pantalla se muestra las opciones a las cuales se puede acceder para la operación del mismo.

Para ingresar a modo calibración se debe digitar en el teclado la opción . como se indica la pantalla principal.



Figura 5.21. Pantalla de control de calibración

Después de haber digitado esta opción, se muestra las opciones
Menú  y Escape ,



Figura 5.22. Pantalla de calibración

Al presionar la opción  podemos ingresar a calibrar los valores de los distintos sensores y del número de pasos. Y si se presiona la opción  es para cancelar..



Figura 5.23. Calibración temperatura aire

Para ingresar a la calibración de los valores máxima y mínima de los sensores, que se controlado dentro del módulo para la activación del motor a pasos debemos volver a presionar la opción  donde se mostrará una pantalla que nos permitirá ingresar los valores de máxima y mínima para los rangos de los sensores de temperatura de aire, temperatura de agua y

número de revoluciones, además del numero de pasos que ha de girar el motor a pasos.

El ingreso de los valores se lo realiza mediante teclado de acuerdo a la tabla de rangos de calibración; para pasar al valor de mínima se presiona

la tecla .



Figura 5.24. Valores máxima y mínima de calibración del sensor de aire



Figura 5.25. Calibración del número de pasos

Después de haber ingresado los valores máxima y mínima de calibración. Procedemos a guardar o salvar los datos ingresados en el

módulo para lo cual presionamos la tecla .

Tabla V.1. Rangos de calibración para los sensores

DATOS	VALORES DE CALIBRACIÓN
Temperatura del aire	Mín. 15 °C Máx. 60 °C
Temperatura del agua	Mín. 20 °C Máx. 120 °C
Revoluciones el motor	Mín. 500 rpm Máx. 900 rpm
Número de pasos	1 - 50

Después de haber guardo los datos de calibración, se presionará la

tecla  para continuar con la calibración de los demás sensores, o la

tecla  para regresar a la opción anterior.



Figura 5.26. Calibración temperatura agua

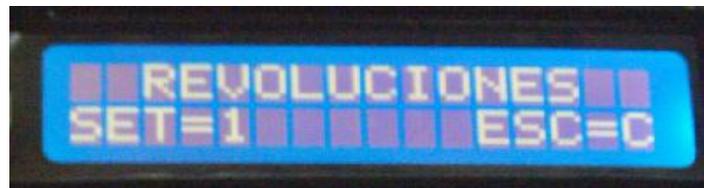


Figura 5.27. Calibración de número de revoluciones



Figura 5.28. Calibración del motor a pasos

5.2.4. VALORES FUERA DE RANGO

Si al momento de ingresar los valores de calibración estos no se encontrarán dentro de los rangos permitidos, o se ingresarán valores incorrectos el sistema no los aceptará.

Por tanto al momentote de presionar la tecla  para guardar los datos en el sistema, este lo comprobara y si encuentra algún error el sistema desplegará un **mensaje “POSIBLEMENTE LOS DATOS ESTÁN MAL”** en la pantalla lo que nos indicará que algún dato ingresado está incorrecto.



Figura 5.29. Pantalla de error de ingreso de datos

Si esto sucediera los valores no se guardarán, y el sistema aceptará los datos correctos ingresados anteriormente.

5.2.5. MODO ACTIVACIÓN

Una vez terminada la calibración de los sensores y del motor a pasos. Podemos proceder con la activación del sistema presionando la opción  tal como se nos indica en la pantalla principal.



Figura 5.30. Pantalla de control de activación

Después de haber activado el sistema de control del módulo. Podemos presionamos la tecla **A** para monitorear y observar el funcionamiento de los distintos sensores y de la variación que existen en los valores que estos están captando.

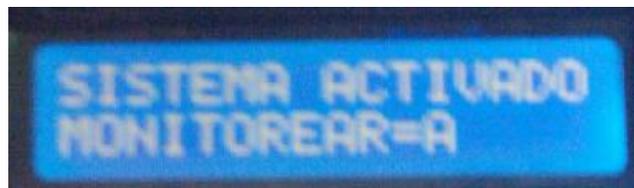


Figura 5.31. Modo de monitoreo

Para continuar observando los demás valores que captan los otros sensores se debe presionar la tecla **A**; o la tecla **C** para regresar a la pantalla anterior.

En la pantalla de monitoreo se puede observar como los sensores van captando la variación de la temperatura del aire y del agua, además de la variación de revoluciones que tiene el motor.

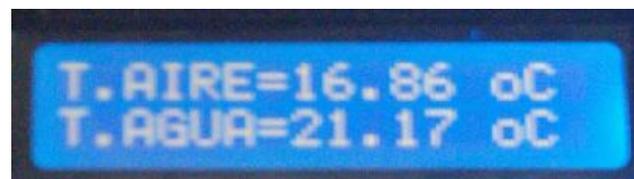


Figura 5.32. Pantalla de monitoreo de temperaturas

Además se podrá verificar la variación que existe en el flujo de aire al momento de ingreso al motor, como así también la variación que capta el sensor de oxígeno.

Al momento de activar el sistema, cuando uno de los sensores capte que se encuentra dentro del rango de calibración ingresado, este enviará una señal al sistema la cual será identificada por el PIC.

Para poder saber el momento en el que un sensor se encuentra dentro del rango de calibración, se han colocado leds indicadores, entonces estos se encenderán cuando un sensor entre en el rango de activación.

El módulo posee cuatro leds indicadores que nos mostrarán cuando las tres señales de activación han llegado al sistema y el otro nos indicará cuando el motor a pasos se activa.

Para que el sistema funcione totalmente y el motor a pasos empiece a girar y abra la válvula bypass, necesita recibir las tres señales de activación que son la temperatura de aire, la temperatura de agua y el número de revoluciones.

Al momento de recibir estas tres señales el sistema activará automáticamente el motor a pasos haciendo girar la válvula bypass para permitir el paso de los gases de escape hacia el múltiple de admisión.

5.2.6. MODO DE DESACTIVACIÓN

Para desactivar el sistema de control se debe presionar la tecla , para lo cual después de haber presionado se mostrará en la pantalla un mensaje de sistema inactivo. Al hacer esto todos los leds

indicadores se encenderán para luego apagarse y regresar al menú principal.



Figura 5.33. Pantalla de sistema inactivo



Figura 5.34. Modulo desactivado

5.2.7. LEDS INDICADORES

Los leds indicadores que se encuentran instalados en el módulo nos ayudarán a saber cuando los sensores captan que el motor ha entrado dentro del rango de calibración ingresado.

Cada uno de los leds se irá encendiendo dependiendo de cómo vaya variando el funcionamiento motor Isuzu 4BD1T y la señal que envíen los sensores al sistema.

Así podemos observar que los tres primeros leds se encienden cuando el motor entra en el rango de temperatura de aire, temperatura de

agua y número de revoluciones. Valores que son necesarios para la activación del motor a pasos.

El led indicador de activación del motor a pasos se encenderá inmediatamente que el sistema capte las tres señales de activación.



Figura 5.35. Leds indicadores

CONCLUSIONES

Finalizado exitosamente el presente trabajo de investigación se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El diseño de los intercambiadores es un área donde tiene diversas aplicaciones los principios de transferencia de calor. El diseño real de un intercambiador de calor es un problema mucho más complicado que el análisis y la transferencia de calor porque en la selección del diseño final juegan un papel muy importante los costos, el peso, el tamaño y la condiciones de acoplamiento
- El uso de un turbocompresor es muy beneficioso para el rendimiento de un motor diesel debido a que el consumo específico de combustible baja con facilidad entre un 15 – 20% debido a que ingresa en los cilindros mayor cantidad de aire.
- El turbocompresor es un elemento mecánico de alta presión, dados los ajustes y las tolerancias muy precisas requeridas para su operación, su diagnóstico y reparación debe realizarse por personas que posean conocimiento básico para su mantenimiento y reparación.
- La formación de óxidos de nitrógeno se reduce bajando la temperatura de combustión en determinadas fases de funcionamiento del motor (baja y media carga). Esto se consigue mediante el sistema de RGE que introduce en los cilindros cierta cantidad de gases de escape que ya ha sido previamente quemado y que prácticamente no contiene oxígeno por lo que apenas arderá.
- El diesel estándar es el que tiene peor comportamiento respecto a las emisiones de humos y partículas, la causa de estos resultados es el

efecto conjunto el alto contenido de hidrocarburo aromáticos, densidad y viscosidad elevada, así como menor volatilidad y número de cetano

- No se debe realizar la introducción de los gases de escape a altas revoluciones ya que precisamente lo que necesita la mezcla es mayor densidad (aire frío) para lograr un mayor rendimiento del ciclo termodinámico del motor.
- El material de la base de la válvula debe ser de hierro fundido ya que tiene que soportar la temperatura de los gases de escape y el deterioro por la acción de los componentes químicos de estos gases
- Este módulo de control está diseñado para un amplio rango de puntos de funcionamiento del motor y grados de apertura de la válvula, lo cual nos permitirá comprender el funcionamiento de un sistema de recirculación de gases de escape.
- El diseño del sistema de recirculación de gases instalado en el motor no impide su normal funcionamiento ya que este no interfiere directamente en ningún sistema.
- La rapidez y calidad del sistema de control depende de los componentes que utilice (sensores) debido a que hay muchos en el mercado con distinta tecnología, lo que podría variar en los resultados obtenidos.
- El módulo de control del sistema nos permite mantener una interacción entre el controlador del sistema y el motor, e inclusive despliega las condiciones de funcionamiento del motor a las que está operando.
- Al momento de realizar las pruebas de operación en el módulo concluimos que la válvula bypass instalada en el motor no se activara si las tres condiciones de funcionamiento no son las adecuadas.

RECOMENDACIONES

Para el diseño, construcción e instalación del modulo de entrenamiento debemos tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Para realizar la comprobación del estado y proceder a la limpieza de la válvula es necesario desmontar el sistema, verificando que la mariposa y el eje de la válvula no se encuentren cubiertos de carbón o aceite ya que en el caso de estar deteriorada anula la funcionalidad del sistema.
- Diseñar correctamente cada una de las placas electrónicas, evitando que exista cruce en las líneas de conexión, y verificando que se encuentren en buen estado.
- Realizar las conexiones de los sensores con mucho cuidado para evitar que los pines de estos sufran daños.
- Revisar las conexiones del motor a pasos para su correcto funcionamiento.
- Revisar que la protección del módulo de control (fusible) se encuentren en buen estado, así como también conectar adecuadamente la alimentación del sistema.
- Antes de encender el módulo de control verificar que su fuente de alimentación de 12v se encuentre correctamente conectada.
- Operar con mucho cuidado el módulo de control para evitar que los elementos electrónicos sufran algún daño ya que estos son sensibles a golpes.

BIBLIOGRAFÍA

- BOSCH.- Electrónica aplicada al motor.
- CORRALES SANTIAGO, Electrónica práctica con microcontroladores PIC, Ed. Imprenta Gráfica, 2006.
- CEAC, Motores Diesel, Grupo Editorial CEAC, Barcelona, 1992.
- CEAC, Turbocompresores, Grupo Editorial CEAC, Barcelona, 1992.
- GIACOSA DANTE, Motores endotérmicos de encendido por compresión, Editorial Dossat, Barcelona – España, 1979.
- MIRALLES DE IMPERIAL JUAN, CEAC, Turbo, sobrealimentación de motores rápidos, Grupo Editorial CEAC, Perú, 1989
- M.S.JOVAJ, Motores de automóvil, Editorial Mir, 1979
- M.S.JOVAJ, Motores de automóvil, Editorial Mir, 1982
- www.robertbosch.com.br
- www.redtécnicaautomotriz.com.
- www.mekanicavirtual.com.

ANEXO A

```

//.....
// Definición de Subrutinas
//.....

void WRITE_FLOAT_EEPROM(long int n, float data);
float READ_FLOAT_EEPROM(long int n);
void LCD_INI(); // inicializacion del lcd
void LCD_REG(char dato);
void LCD_DATO(char dato);
void LCD_RamStr(char* str);
void mostrar_rpm();
void leer_ADC();

void delay(); // rutina de tiempo
void decod_teclado(); // rutina para decodificar el teclado
void menu_inicio(); // rutina de inicio
void menu_principal();
void calibrar();
void activar();
void desactivar();
void temperaturas();
void flujo_rpm();
void mostrar_t1();
void mostrar_t2();
void mostrar_flujo_aire();
void menu_flujo_oxigeno();
void mostrar_flujo_oxigeno();
void temperatura_aire();
void temperaturas_main();
void set_temperaturas();
void salvar();
void temperatura_agua();
void revoluciones();
void motor_pasos();
void pasos();
void verificar_tamx();
void verificar_tami();
void verificacion_1();
void verificacion_2();
void verificacion_3();
void nota();
void verificar_tagmx();
void verificar_tagmi();
void verificar_rpmmax();
void verificar_rpmmin();
void verificar_npasos();
void monitoreo_datos_activos();

```

```

//.....
#define LCD_PORT *0x08
#define LCD_RS      PIN_E1
#define LCD_E       PIN_E2
char TECLA, LETRA;
char i,num;
char ind_valor;
char VALOR_ING[5];
char VALOR_ING_1[5];
char texto_LCD[16];
char MODO_AUX;
char contador_r;
unsigned long reversa;

unsigned long cont_frec, frec[4];
float temp_aire,temp_agua,flujo_aire,flujo_oxi,sum_frec;
float T_aire_max,T_aire_min,T_agua_max,T_agua_min,rpm_max,rpm_min,T_apertura;

struct
{
    char dato                : 1;
    char leerrpm             : 1;
    char leeradc             : 1;
    char mostrar_fa         : 1;
    char mostrar_temp       : 1;
    char mostrar_fo         : 1;
    char verrpm             : 1;
    char datos_1            : 1;
    char save_tamx          : 1;
    char save_tami          : 1;
    char save_tagmx        : 1;
    char save_tagmi        : 1;
    char save_rpmax        : 1;
    char save_rpmin        : 1;
    char notificacion       : 1;
    char save_pasos         : 1;
    char monitoreo_datos : 1;
    char accionar_mpap     : 1;
    char parar_monitor     : 1;
    char devolver_motor    : 1;

} BANDERAS;

enum
{
    menu_ini,
    menu_princi,

```

```
menu_calibrar,  
menu_activar,  
menu_desactivar,  
menu_temp_aire,  
menu_monitorear_T,  
menu_monitorear_F,  
menu_monitorear_F_O2,  
set_temp_aire,  
set_temp_agua,  
set_revoluciones,  
set_motor_pasos,  
menu_salvar,  
menu_temp_agua,  
menu_revoluciones,  
menu_motor_pasos
```

```
}MODO=menu_ini;
```

```
#INT_TIMER1
```

```
void Interrup_TIMER1()
```

```
{
```

```
    set_timer1(-62500);
```

```
    frec[0]=frec[1];
```

```
    frec[1]=frec[2];
```

```
    frec[2]=frec[3];
```

```
    frec[3]=cont_frec;
```

```
    cont_frec=0;
```

```
}
```

```
#INT_EXT
```

```
void Interrup_EXT()
```

```
{
```

```
    cont_frec++;
```

```
}
```

```
void main()
```

```
{
```

```
    T_aire_max=READ_FLOAT_EEPROM(0);
```

```
    T_aire_min=READ_FLOAT_EEPROM(4);
```

```
    T_agua_max=READ_FLOAT_EEPROM(8);
```

```
    T_agua_min=READ_FLOAT_EEPROM(12);
```

```
    rpm_max=READ_FLOAT_EEPROM(16);
```

```
    rpm_min=READ_FLOAT_EEPROM(20);
```

```
    T_apertura=READ_FLOAT_EEPROM(24);
```

```

set_tris_a(0b00011111);           // configuracion de los puertos del PIC
set_tris_b(0b11110001);
set_tris_d(0b00000000);
set_tris_c(0b00000000);
set_tris_e(0b00000000);

setup_adc_ports(AN0_AN1_AN2_AN3_AN4); // configuracion del ADC
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_8);
set_timer1(-62500);

port_b_pullups(TRUE);
output_b(0x00);
output_c(0x00);

enable_interrupts(INT_RB);
enable_interrupts(INT_EXT);
enable_interrupts(INT_TIMER1);
enable_interrupts(GLOBAL);

BANDERAS.dato=1;
BANDERAS.datos_1=0;
BANDERAS.leerrpm=0;
BANDERAS.mostrar_temp=0;
BANDERAS.mostrar_fa=0;
BANDERAS.mostrar_fo=0;

LCD_INI();
delay_ms(100);

while(TRUE)
{
    mostrar_rpm();
    leer_ADC();
    if(BANDERAS.monitoreo_datos)
    {
        monitoreo_datos_activos();
    }

    if(BANDERAS.devolver_motor)
    {
        BANDERAS.devolver_motor=0;
        reversa=input_C();
        reversa=reversa & 0b11110000;
        if(reversa==16)
            reversa=256;
        for(contador_r=T_apertura;contador_r>=1;contador_r--)

```

```

    {
        reversa=reversa/2;
        output_C(reversa | 0b00001111);
        delay_ms(50);
        if(reversa==16)
            reversa=256;
    }
    output_C(0);
}

if (BANDERAS.dato==1)
{
    BANDERAS.dato=0;

    switch(MODO)
    {
        case menu_ini:
        {
            menu_inicio();
            for(i=0;i<10;i++)
                delay_ms(200);
            menu_principal();
            MODO=menu_princi;
            break;
        }

        case menu_calibrar:
        {
            calibrar();
            break;
        }

        case menu_temp_aire:
        {
            temperatura_aire();
            temperaturas_main();
            break;
        }

        case set_revoluciones:
        case set_temp_agua:
        case set_temp_aire:
        {
            set_temperaturas();
            LCD_DATO(" ");
            LCD_REG(0x89);
            LCD_REG(0x0D);
            break;
        }
    }
}

```

```

}

case menu_temp_agua:
{
    temperatura_agua();
    temperaturas_main();
    break;
}

case menu_revoluciones:
{
    revoluciones();
    temperaturas_main();
    break;
}

case menu_motor_pasos:
{
    motor_pasos();
    temperaturas_main();
    break;
}

case set_motor_pasos:
{
    pasos();
    LCD_DATO("  ");
    LCD_REG(0x89);
    LCD_REG(0x0D);
    break;
}

case menu_salvar:
{
    /*******
    if(MODO_AUX==menu_temp_aire)
    {
        T_aire_max=atof(VALOR_ING);
        verificar_tamx();
        if(BANDERAS.save_tamx)
        {
            WRITE_FLOAT_EEPROM(0,T_aire_max);
            delay_us(100);
            BANDERAS.save_tamx=0;
        }

        T_aire_min=atof(VALOR_ING_1);
        verificar_tami();
    }
}

```

```

        if(BANDERAS.save_tami)
        {
            WRITE_FLOAT_EEPROM(4,T_aire_min);
            delay_us(100);
            BANDERAS.save_tami=0;
        }
    verificacion_1();
}

//*****
if(MODO_AUX==menu_temp_agua)
{
    T_agua_max=atof(VALOR_ING);
    verificar_tagmx();
        if(BANDERAS.save_tagmx)
        {
            WRITE_FLOAT_EEPROM(8,T_agua_max);
            delay_us(100);
            BANDERAS.save_tagmx=0;
        }

    T_agua_min=atof(VALOR_ING_1);
    verificar_tagmi();
        if(BANDERAS.save_tagmi)
        {
            WRITE_FLOAT_EEPROM(12,T_agua_min);
            delay_us(100);
            BANDERAS.save_tagmi=0;
        }
    verificacion_2();
}

//*****
if(MODO_AUX==menu_revoluciones)
{
    rpm_max=atof(VALOR_ING);
    verificar_rpmax();
        if(BANDERAS.save_rpmax)
        {
            WRITE_FLOAT_EEPROM(16,rpm_max);
            delay_us(100);
            BANDERAS.save_rpmax=0;
        }

    rpm_min=atof(VALOR_ING_1);
    verificar_rpmin();
        if(BANDERAS.save_rpmin)
        {

```

```

        WRITE_FLOAT_EEPROM(20,rpm_min);
        delay_us(100);
        BANDERAS.save_rpmin=0;
    }
    verificacion_3();
}

/*****
if(MODO_AUX==menu_motor_pasos)
{
    T_apertura=atof(VALOR_ING);

    verificar_npasos();
        if(BANDERAS.save_pasos)
        {
            WRITE_FLOAT_EEPROM(24,T_apertura);
            delay_us(100);
            BANDERAS.save_pasos=0;
        }
    }

/*****
LCD_REG(0x0C);
if(BANDERAS.notificacion)
{
    nota();
    BANDERAS.notificacion=0;
    for(i=0;i<10;i++)
        delay_ms(200);
}

    salvar();
    for(i=0;i<10;i++)
        delay_ms(200);
    MODO=MODO_AUX;
    BANDERAS.dato=1;
    break;
}

case menu_activar:
{
    activar();
    break;
}

case menu_desactivar:
{

```



```

//*****
**
void menu_inicio()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("CONTROL DIGITAL");
    LCD_REG(0xC4);
    LCD_DATO("DE DATOS");
}
void menu_principal()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x81);
    LCD_DATO("MENU PRINCIPAL");
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("CAL.=1  ACT.=2");
}
void calibrar()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x82);
    LCD_DATO("CALIBRACION");
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("MENU=1  ESC=C");
}
void activar()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("SISTEMA ACTIVADO");
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("MONITOREAR=A");
}
void desactivar()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("SISTEMA INACTIVO");
}
void temperaturas()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("T.AIRE=");
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("T.AGUA=");
}

```

```

void flujo_rpm()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("F.AIRE=");
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("R.P.M=");
}
void menu_flujo_oxigeno()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("F.OXIG=");
}
void temperatura_aire()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("TEMPERATURA AIRE");
}
void temperatura_agua()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("TEMPERATURA AGUA");
}
void revoluciones()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x82);
    LCD_DATO("REVOLUCIONES");
}
void motor_pasos()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x81);
    LCD_DATO("MOTOR A PASOS");
}
void pasos()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("No PASOS=");
}
void temperaturas_main()
{
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("SET=1   ESC=C");
}

```

```

}
void set_temperaturas()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("MAXIMA=");
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("MINIMA=");
}
void salvar()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x84);
    LCD_DATO("GUARDANDO");
    LCD_REG(0xC6);
    LCD_DATO("DATOS");
}
void nota()
{
    LCD_REG(1);
    LCD_REG(0x80);
    LCD_DATO("POSIBLEMENTE LOS");
    LCD_REG(0xC0);
    LCD_DATO("DATOS ESTAN MAL");
}
#INT_RB
void Interrup_RB() // INTERRUPCION POR TECLADO
{
    TECLA=decod_teclado();
    RBIF=0;

//-----
//    MENU PRINCIPAL
//-----

    if(MODO==menu_princi)
    {
        if(TECLA=='1')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_calibrar;

        }
        if(TECLA=='2')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_activar;
            BANDERAS.leerrpm=1;
            BANDERAS.leeradc=1;
        }
    }
}

```

```

        BANDERAS.monitoreo_datos=1;
        BANDERAS.parar_monitor=1;
    }
    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_ini;
    }
    return;
}

//-----
//  MENU CALIBRAR
//-----

if(MODO==menu_calibrar)
{
    if(TECLA=='1')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_temp_aire;
    }

    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_princi;
    }
    return;
}

//-----
//  MENU ACTIVAR
//-----

if(MODO==menu_activar)
{
    if(TECLA=='A')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_monitorear_T;
    }

    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_desactivar;
    }
}

```

```

        BANDERAS.leerrpm=0;
        BANDERAS.leeradc=0;
        BANDERAS.monitoreo_datos=0;
    }
    return;
}

//-----
//  MENU TEMPERATURA AIRE
//-----

if(MODO==menu_temp_aire)
{
    if(TECLA=='1')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=set_temp_aire;
        MODO_AUX=menu_temp_aire;
        num=4;
    }

    if(TECLA=='A')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_temp_agua;
    }

    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_calibrar;
    }
    return;
}

//-----
//  MENU TEMPERATURA AGUA
//-----

if(MODO==menu_temp_agua)
{
    if(TECLA=='1')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=set_temp_agua;
        MODO_AUX=menu_temp_agua;
        num=4;
    }
}

```

```

        if(TECLA=='A')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_revoluciones;
        }

        if(TECLA=='C')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_temp_aire;
        }
        return;
    }

//-----
//   MENU REVOLUCIONES
//-----

    if(MODO==menu_revoluciones)
    {
        if(TECLA=='1')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=set_revoluciones;
            MODO_AUX=menu_revoluciones;
            num=4;
        }

        if(TECLA=='A')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_motor_pasos;
        }

        if(TECLA=='C')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_temp_agua;
        }
        return;
    }

//-----
//   MENU DEL MOTOR A PASOS
//-----

    if(MODO==menu_motor_pasos)

```

```

    {
        if(TECLA=='1')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=set_motor_pasos;
            MODO_AUX=menu_motor_pasos;
            num=2;
        }

        if(TECLA=='A')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_calibrar;
        }

        if(TECLA=='C')
        {
            BANDERAS.dato=1;
            MODO=menu_revoluciones;
        }
        return;
    }
}
//-----
//   MENU MONITOREAR TEMPERATURAS
//-----

if(MODO==menu_monitorear_T)
{
    if(TECLA=='A')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_monitorear_F;
    }

    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_activar;
        //BANDERAS.leeradc=0;
        BANDERAS.mostrar_temp=0;
    }
    return;
}

//-----
//   MENU MONITOREAR FLUJO AIRE RPM
//-----

```

```
//-----
if(MODO==menu_monitorear_F)
{
    if(TECLA=='A')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_monitorear_F_O2;
        BANDERAS.mostrar_fa=0;
        //BANDERAS.leerrpm=0;
        BANDERAS.verrpm=0;
    }

    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_monitorear_T;
        BANDERAS.mostrar_fa=0;
        //BANDERAS.leerrpm=0;
        BANDERAS.verrpm=0;
    }
    return;
}
}
```

```
//-----
//    MENU MONITOREAR FLUJO OXIGENO
//-----
```

```
if(MODO==menu_monitorear_F_O2)
{
    if(TECLA=='A')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_activar;
        BANDERAS.mostrar_fo=0;
        BANDERAS.mostrar_fa=0;
        //BANDERAS.leerrpm=0;
        //BANDERAS.verrpm=0;
    }

    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_monitorear_F;
        BANDERAS.mostrar_fo=0;
        BANDERAS.mostrar_fa=0;
    }
}
```

```

        //BANDERAS.leerrpm=0;
        //BANDERAS.verrpm=0;
    }
    return;
}

//*****
*****

    if(MODO==set_temp_aire || MODO==set_temp_agua || MODO==set_revoluciones
|| MODO==set_motor_pasos)
    {
        if(TECLA>='0' && TECLA<='9')
        {

            if(ind_valor<num && !BANDERAS.datos_1)
            {
                LETRA=TECLA;
                VALOR_ING[ind_valor++]=TECLA;
                VALOR_ING[ind_valor]=0;
                LCD_DATO(LETRA);
                LETRA=0;
            }

            if(ind_valor<num && BANDERAS.datos_1)
            {
                LETRA=TECLA;
                VALOR_ING_1[ind_valor++]=TECLA;
                VALOR_ING_1[ind_valor]=0;
                LCD_DATO(LETRA);
                LETRA=0;
            }
        }

        if(TECLA=='A' && MODO!=set_motor_pasos)
        {
            LCD_DATO("  ");
            LCD_REG(0xC9);
            ind_valor=0;
            BANDERAS.datos_1=1;
        }

        if(TECLA=='B' && MODO!=set_motor_pasos &&
MODO!=set_revoluciones)
        {
            LETRA='.';
            VALOR_ING[ind_valor++]='.';
            VALOR_ING[ind_valor]=0;

```

```

        LCD_DATO(LETRA);
        LETRA=0;
    }

    if(TECLA=='E')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=menu_salvar;
        ind_valor=0;
        BANDERAS.datos_1=0;
    }

    if(TECLA=='C')
    {
        BANDERAS.dato=1;
        MODO=MODO_AUX;
        LCD_REG(0x0C);
        ind_valor=0;
        BANDERAS.datos_1=0;
    }

    return;
}
}
//.....
// Rutina de Decodificación del Teclado
//.....
char decod_teclado()
{
    delay();
    output_d(0b11100000);
    if(!input(PIN_B7))
        return 'A';
    if(!input(PIN_B6))
        return '3';
    if(!input(PIN_B5))
        return '2';
    if(!input(PIN_B4))
        return '1';

    delay();
    output_d(0b11010000);
    if(!input(PIN_B7))
        return 'B';
    if(!input(PIN_B6))
        return '6';
    if(!input(PIN_B5))
        return '5';
}

```

```

        if (!input(PIN_B4))
            return '4';

        delay();
        output_d(0b10110000);
        if (!input(PIN_B7))
            return 'C';
        if (!input(PIN_B6))
            return '9';
        if (!input(PIN_B5))
            return '8';
        if (!input(PIN_B4))
            return '7';

        delay();
        output_d(0b01110000);
        if (input(PIN_B7))
            return 'D';
        if (input(PIN_B6))
            return 'F';
        if (input(PIN_B5))
            return '0';
        if (input(PIN_B4))
            return 'E';

        output_d(0);
        return 0;
    }
    void delay()
    {
        long p;
        for(p=0;p<8000;p++);
    }
    //.....
    // Rutina de Inicialización del Módulo LCD
    //.....
    void LCD_INI()
    {
        delay_ms(15);
        output_low(LCD_RS);
        output_low(LCD_E);

        output_d(0b00000011);
        output_high(LCD_E);
        delay_us(1);
        output_low(LCD_E);

        delay_ms(4);
    }

```

```

output_d(0b00000011);
output_high(LCD_E);
delay_us(1);
output_low(LCD_E);

delay_us(100);

output_d(0b00000000);
output_d(0b00000011);
output_high(LCD_E);
delay_us(1);
output_low(LCD_E);

delay_us(100);

output_d(0b00000010);
output_high(LCD_E);
delay_us(1);
output_low(LCD_E);

delay_us(100);

LCD_REG(0b00101000);
LCD_REG(0b00001100);
LCD_REG(0b00000001);
LCD_REG(0b00000110);
}

void LCD_REG(char dato)
{
    char x;

    output_low(LCD_RS);
    x=input_d();
    x&=0b11010000;
    output_d(x|(dato>>4&0b00001111));
    output_high(LCD_E);

    delay_us(1);
    output_low(LCD_E);

    x=input_d();
    x&=0b11010000;
    output_d(x|(dato&0b00001111));

    output_high(LCD_E);

```

```

        delay_us(1);
        output_low(LCD_E);

        delay_ms(4);
    }

void LCD_DATO(char dato)
{
    char x;

    output_high(LCD_RS);
    x=input_d();
    x&=0b11010000;
    output_d(x|(dato>>4&0b00001111));
    output_high(LCD_E);
    delay_us(1);
    output_low(LCD_E);

    x=input_d();
    x&=0b11010000;
    output_d(x|(dato&0b00001111));
    output_high(LCD_E);
    delay_us(1);
    output_low(LCD_E);

    delay_ms(4);
}

void LCD_RamStr(char* str)
{
    while(*str)
        LCD_DATO(*str++);
}
//-----
//   DEFINICION DE SUBROUTINAS
//-----

void WRITE_FLOAT_EEPROM(long int n, float data)
{
    int i;

    for (i = 0; i < 4; i++)
        write_eeprom(i + n, *(&data + i) );
}
float READ_FLOAT_EEPROM(long int n)
{
    int i;
    float data;

```

```

for (i = 0; i < 4; i++)

*(&data + i) = read_eeprom(i + n);

return(data);
}

void mostrar_rpm()
{
    if(BANDERAS.leerrpm)
    {
        char i;
        //float sum_frec;
        sum_frec=0.0;
        for(i=0;i<4;i++)
        {
            sum_frec+=frec[i];
        }
        sum_frec=sum_frec*8.333334;

        if(BANDERAS.verrpm)
        {
            sprintf(texto_LCD,"%4.1f Rpm",sum_frec);
            LCD_REG(0xC7);
            LCD_RamStr(texto_LCD);
        }
    }
}

void leer_ADC()
{
    if(BANDERAS.leeradc)
    {
        set_adc_channel(0);
        delay_us(100);
        temp_aire=(float)read_adc(ADC_START_AND_READ)/255.0;
        temp_aire=100.0-(temp_aire*5.0)*20.0;

        set_adc_channel(1);
        delay_us(100);
        temp_agua=(float)read_adc(ADC_START_AND_READ)/255.0;
        temp_agua=120.0-(temp_agua*5.0)*24.0;

        set_adc_channel(2);
        delay_us(100);
        flujo_oxi=(float)read_adc(ADC_START_AND_READ)/255.0;
        flujo_oxi=(flujo_oxi*5.0);
    }
}

```

```

set_adc_channel(3);
delay_us(100);
flujo_aire=(float)read_adc(ADC_START_AND_READ)/255.0;
flujo_aire=(flujo_aire*5.0);

        if(BANDERAS.mostrar_temp)
        {
                mostrar_t1();
                mostrar_t2();
        }
        if(BANDERAS.mostrar_fa)
        {
                mostrar_flujo_aire();
        }
        if(BANDERAS.mostrar_fo)
        {
                mostrar_flujo_oxigeno();
        }
}
}
void mostrar_t1()
{
        //temp_aire=T_aire_max*temp_aire;
        LCD_REG(0x87);
        sprintf(texto_LCD,"%2.2foC ",temp_aire);
        LCD_RamStr(texto_LCD);
}
void mostrar_t2()
{
        //temp_agua=T_agua_max*temp_agua;
        LCD_REG(0xC7);
        sprintf(texto_LCD,"%2.2foC ",temp_agua);
        LCD_RamStr(texto_LCD);
}
void mostrar_flujo_aire()
{
        LCD_REG(0x88);
        sprintf(texto_LCD,"%2.2fV ",flujo_aire);
        LCD_RamStr(texto_LCD);
}
void mostrar_flujo_oxigeno()
{
        LCD_REG(0x88);
        sprintf(texto_LCD,"%2.2fV ",flujo_oxi);
        LCD_RamStr(texto_LCD);
}
void verificar_tamx()

```

```

{
    if(T_aire_max<=60 && T_aire_max>=15)
    {
        BANDERAS.save_tamx=1;
    }
    else
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
        T_aire_max=60;
        BANDERAS.save_tamx=1;
    }
}
void verificar_tami()
{
    if(T_aire_min<=60 && T_aire_min>=15)
    {
        BANDERAS.save_tami=1;
    }
    else
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
        T_aire_min=15;
        BANDERAS.save_tami=1;
    }
}
void verificacion_1()
{
    if(T_aire_max<=T_aire_min)
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
    }
}
void verificar_tagmx()
{
    if(T_agua_max<=120 && T_agua_max>=20)
    {
        BANDERAS.save_tagmx=1;
    }
    else
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
        T_agua_max=120;
        BANDERAS.save_tagmx=1;
    }
}
void verificar_tagmi()
{

```

```

    if(T_agua_min<=120 && T_agua_min>=20)
    {
        BANDERAS.save_tagmi=1;
    }
    else
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
        T_agua_min=20;
        BANDERAS.save_tagmi=1;
    }
}
void verificacion_2()
{
    if(T_agua_max<=T_agua_min)
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
    }
}
void verificar_rpmax()
{
    if(rpm_max<=3000 && rpm_max>=16)
    {
        BANDERAS.save_rpmax=1;
    }
    else
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
        rpm_max=3000;
        BANDERAS.save_rpmax=1;
    }
}
void verificar_rpmin()
{
    if(rpm_min<=3000 && rpm_min>=16)
    {
        BANDERAS.save_rpmin=1;
    }
    else
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
        rpm_max=16;
        BANDERAS.save_rpmin=1;
    }
}
void verificacion_3()
{
    if(rpm_max<=rpm_min)
    {

```

```

        BANDERAS.notificacion=1;
    }
}
void verificar_npasos()
{
    if(T_apertura<=50 && T_apertura>=1)
    {
        BANDERAS.save_pasos=1;
    }
    else
    {
        BANDERAS.notificacion=1;
        T_apertura=50;
        BANDERAS.save_pasos=1;
    }
}
void monitoreo_datos_activos()
{
    char puerto;
    char salida,contador;

    if(BANDERAS.parar_monitor)
    {

        if(temp_aire<=T_aire_max && temp_aire>=T_aire_min)
        {
            output_high(PIN_C0);
        }
        else
        {
            output_low(PIN_C0);
        }

        if(temp_agua<=T_agua_max && temp_agua>=T_agua_min)
        {
            output_high(PIN_C1);
        }
        else
        {
            output_low(PIN_C1);
        }

        if(sum_frec<=rpm_max && sum_frec>=rpm_min)
        {
            output_high(PIN_C2);
        }
        else
        {

```

```

        output_low(PIN_C2);
    }

    puerto=input_c();
    puerto=puerto & 0b00000111;

    if(puerto==0x07)
    {
        output_high(PIN_C3);
        BANDERAS.accionar_mpap=1;
    }
    else
    {
        output_low(PIN_C3);
    }

    if(BANDERAS.accionar_mpap)
    {
        salida=8;
        BANDERAS.accionar_mpap=0;
        BANDERAS.parar_monitor=0;

        for(contador=0;contador<=T_apertura;contador++)
        {
            salida=salida*2;
            output_C(salida | 0b00001111);
            delay_ms(50);
            if(salida==128)
                salida=8;
        }
    }
}
}
}

```

ANEXO B

