

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS
VICERRECTORÍA ACADÉMICA**



ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**METODOS, DISEÑO E IMPLEMENTACION PARA
AUMENTAR LA EFICIENCIA, AUTONOMIA Y POTENCIA DE
UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA 4 LITROS 6
CILINDROS DE UN JEEP WRANGLER 1998**

**MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO
DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

DAVID ANTONIO BARRANTES GONZÁLEZ

AUTOR

ING. JOSÉ ROMERO MENESES

TUTOR

SEDE ARANJUEZ, SAN JOSE, COSTA RICA

DICIEMBRE, 2021

CONTENIDO

CONTENIDO.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	11
ÍNDICE DE IMAGENES.....	12
DEDICATORIA.....	16
AGRADECIMIENTOS.....	17
ACRÓNIMOS.....	18
RESUMEN EJECUTIVO.....	19
CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA.....	20
1.1 Introducción.....	20
1.2 Planteamiento del problema.....	21
1.3 Objetivo.....	21
1.3.1 Objetivo general.....	21
1.3.2 Objetivo específico.....	21
1.4 Justificación.....	22
1.5 Antecedentes.....	23

1.6 Proyecciones y alcances	35
1.7 Limitaciones.....	35
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	36
2.1 Motor de combustión interna.....	36
2.1.1 Relación de compresión.....	36
2.2 Sistema de inyección de combustible:	37
2.2.1. Mezcla de combustible	37
2.2.2. Octanaje	37
2.2.3. Sensor de Oxígeno:.....	38
2.2.3.1 Sonda lambda de circonio (narrowband o banda corta)	38
2.2.3.2 Sonda lambda de banda ancha (wideband o banda ancha).....	38
2.2.4 Inyectores de combustible:	38
2.2 Sistema de encendido:	38
2.2.1 Avance del encendido:.....	39
2.2.2 Detonación:	39
2.2.3 Autoencendido:	40
2.3 Inducción Forzada o sobrealimentación.....	40
2.2.2. Supercargador o compresor volumétrico:.....	40
2.2.3. Turbocompresor:	40
2.4 Intercambiador de calor o “Intercooler”:	41
2.5 Emisiones	41
2.5.1 Monóxido de Carbono.....	41
2.5.2 Dióxido de Carbono	41
2.5.3 Hidrocarburos no quemados:	41
2.5.4 Óxidos de Azufre	42
2.5.5 Óxidos de nitrógeno:	42
2.5.6 OBD:.....	42
2.5.7 OBDII:	42
2.6 Revisión técnica Vehicular de Costa Rica.....	43
2.7 Términos financieros	43

	8
2.7.1 VAN	43
2.7.2 TIR.....	44
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO	45
3.1 Enfoque de investigación.....	45
3.2 Método de investigación.....	45
3.3 Fuentes de información	45
3.3.1 Tesis relacionadas con el tema.....	45
3.3.2 Manual de servicio original del vehículo por convertir.....	46
3.3.3 Especificaciones del turbocompresor o similares a este.....	46
3.3.4 Manual de operación de la computadora original	46
3.3.5 Libros relacionados con motores de combustión y sistemas de inducción forzadas	46
3.3.6 Páginas de internet de los fabricantes.....	46
3.4 Variables o unidades de análisis.....	46
3.5 Instrumentos.....	47
3.6 Procesos para la recolección y el análisis de datos	47
CAPÍTULO IV. DISEÑO	48
4.1 Diagnóstico.....	48
4.2 Desarrollo.....	48
4.2.1 Características originales del vehículo	48
4.2.1.1 Motor de combustión.....	48
4.2.2 Desarrollo de modificaciones.....	52
4.2.2.1 Primera etapa. Cambios en el software de la computadora.....	52
4.2.2.2 Segunda etapa. Cambios de inyectores.	59
4.2.2.3 Tercera etapa. Inducción forzada.	66
4.3 Análisis de resultados	102
4.3.1 Potencia.....	102
4.3.1.1 Original.....	102
4.3.1.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora.....	102
4.3.1.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.	102

4.3.1.4 Etapa 3. Inducción forzada	102
4.3.2 Consumo	102
4.3.2.1 Original	102
4.3.2.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora.....	102
4.3.2.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.	102
4.3.2.4 Etapa 3. Inducción forzada	103
4.3.3 Emisiones.....	103
4.3.3.1 Original.....	103
4.3.3.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora.....	103
4.3.3.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.	103
4.3.3.4 Etapa 3. Inducción forzada	103
4.3.4 Costo.....	104
4.3.4.1 Original.....	104
4.3.4.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora.....	104
4.3.4.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.	104
4.3.4.4 Etapa 3. Inducción forzada	104

CAPITULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

.....	105
5.1 Conclusiones	105
5.2 Recomendaciones.....	106
5.3 Implementación del proyecto	106
5.3.1 Primera etapa. Cambios en el software de la computadora	106
5.3.1.1 Partes requeridas:	106
5.3.1.2 Procedimiento:	106
5.3.2 Segunda etapa. Cambios de inyectores.....	107
5.3.2.1 Partes requeridas:	107
5.3.2.2 Procedimiento:	107
5.3.3 Tercera etapa. Inducción forzada	108
5.3.3.1 Partes requeridas:	108
5.3.3.2 Procedimiento:	109
REFERENCIAS	111

ANEXO.....113

FIGURAS.....113

Imágenes:.....114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación Voltaje/Vacío del sensor MAP.....	50
Tabla 2. Emisiones medidas por Revisión Técnica Vehicular (RTV). Plantel de San Miguel.	51
Tabla 3. Partes utilizadas en las tres etapas.	57
Tabla 4. Comparación de emisiones tomadas durante las pruebas de revisión técnica vehicular.	66
Tabla 5. Comparación de presiones, altitudes y potencias.	76
Tabla 6. Comparación de presiones, altitudes y potencias. Turbocompresor trim 46.....	76
Tabla 7. Comparación de presiones, altitudes y potencias. Turbocompresor trim 50.....	77
Tabla 8. Comparación de escala real contra escala del software.....	88
Tabla 9. Consumos previos a las modificaciones.....	100
Tabla 10. Consumos después de las modificaciones.....	100
Tabla 11. Emisiones después de las tres etapas.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tabla de relación Presión atmosférica y altura sobre el nivel del mar.....	113
Figura 2. Máximo torque al freno de un motor de combustión interna.....	113

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo del flujo del aire al motor	67
Ecuación 2. Cálculo de la presión en el colector de admisión en el motor.	67
Ecuación 3. Cálculo de la presión en la salida del compresor.....	68
Ecuación 4. Cálculo de la presión en la entrada del compresor.	68
Ecuación 5. Cálculo de la relación de presión entre entrada y salida del compresor	69
Ecuación 6. Cálculo de la presión en el colector de admisión en el motor.	71
Ecuación 7. Relación de compresión efectiva.	99
Ecuación 8. Eficiencia térmica del motor de ciclo Otto.	99

ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición original.....	49
Imagen 2. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible original ...	49
Imagen 3. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD4.4.....	53
Imagen 4. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD4.5.....	54
Imagen 5. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible MOD4.4 .	54
Imagen 6. Registro Original	55
Imagen 7. Registro con MOD4.4	55
Imagen 8. Registro con MOD4.5	55
Imagen 9. Comparación de tabla de avance de ignición entre original VS MOD4.4	56
Imagen 10. Comparación de tabla de apertura de inyectores entre original VS MOD4.4 .	56
Imagen 11. Comparación de tabla de avance de ignición entre MOD4.5 VS MOD4.4.....	56
Imagen 12. Tomada de Google Maps.....	58
Imagen 13 . Comparación lateral entre inyector original (izquierdo) e inyector nuevo (derecho).....	60
Imagen 14. Comparación inferior entre inyector original (izquierdo) e inyector nuevo (derecho).....	60
Imagen 15. Inyectores originales instalados.....	61
Imagen 16. Inyectores nuevos instalados	61
Imagen 17. Comparación de la aspersion entre un inyector de 4 orificios (4 izquierdos) y de un orificio (los 4 siguientes a la derecha).....	61
Imagen 18 Tablas modificadas. MOD5.3 de sistema de combustible	63
Imagen 19. Tablas originales de sistema de combustible.....	63
Imagen 20. Comparación de Tablas modificadas entre MOD5.3 y tablas originales de sistema de combustible.....	63
Imagen 21. Registro con Original en ralentí.....	64
Imagen 22. Registro con MOD5.3 en ralentí.....	65
Imagen 23. Turbocompresor Garrett GT2052.....	70
Imagen 24. Mapa del Turbocompresor Garrett GT2052.....	70
Imagen 25. Mapa del Turbocompresor Garrett GT2052 mostrando el punto de operación máxima con el ejemplo.....	71

Imagen 26. Mapa del Turbocompresor Garrett GT2052 mostrando el punto de operación media con el ejemplo.....	72
Imagen 27. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 46	74
Imagen 28. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 50	74
Imagen 29. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 46 con el rango de operación máximo.....	75
Imagen 30. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 50 con el rango de operación máximo.....	75
Imagen 31. Posibilidad de posición del turbocompresor.....	77
Imagen 32. Esquema en general del diseño del colector.....	78
Imagen 33. Inicio de la construcción del colector de escape.....	78
Imagen 34. Alineamiento de los codos de 45 grados del colector de escape.....	79
Imagen 35. Resultado final del colector de escape con el turbocompresor instalado.	79
Imagen 36. Bajante del tubo de escape después del turbocompresor.....	80
Imagen 37. Tubería de escape con aislante.	81
Imagen 38. Final del bajante previo a la instalación del adaptador.....	81
Imagen 39. Instalación del catalizador con el adaptador.....	82
Imagen 40. Conjunto final del catalizador con el silenciador.	82
Imagen 41. Cambio de posición del tanque de agua jabonosa y preparación del espacio para el intercambiador de calor	83
Imagen 42. Construcción del depurador a medida	83
Imagen 43. instalación del depurador con el filtro de aire.	84
Imagen 44. Sistema de admisión instalado.....	84
Imagen 45. Ubicación de los sensores de mezcla de combustible	85
Imagen 46. Monitor del sensor de mezcla de combustible de banda ancha.....	86
Imagen 47. Diagrama eléctrico del sensor de presión absoluta del colector original marcado con el óvalo rojo.....	87
Imagen 48. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD1.0_BOOST	89
Imagen 49. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD1.13_BOOST	89

Imagen 50. Comparación de tabla de avance de ignición entre MOD1.0_BOOST VS MOD1.13_BOOST	90
Imagen 51. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible MOD1.0_BOOST	91
Imagen 52. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible MOD1.13_BOOST	91
Imagen 53 Comparación de tabla de apertura de inyectores entre MOD1.0_BOOST VS MOD1.13_BOOST	91
Imagen 54. Registro de temperaturas con sistema de admisión original.....	92
Imagen 55. Registro de temperaturas con sistema de admisión modificado incluyendo intercambiador de calor.	92
Imagen 56. Sistema de escape instalado.....	93
Imagen 57. Cobertor de fibra de vidrio instalado.....	93
Imagen 58. Fotografía termográfica después de la operación del vehículo	94
Imagen 59 Fotografía termográfica comparación entre acople de la turbina del turbocompresor y cobertor de turbina de fibra de vidrio.	94
Imagen 60. Fotografía termográfica comparación entre acople de la turbina del turbocompresor y cobertor de tubo de escape (bajante) fibra de vidrio.....	95
Imagen 61. Primer codo instalado.	96
Imagen 62. Primer codo instalado expandido por la presión positiva.....	96
Imagen 63. Primer codo instalado roto por fatiga.	97
Imagen 64. Segundo codo durante la instalación.	97
Imagen 65. Registro con MOD1.13_BOOST	98
Imagen 66. Ejemplo de operación a máxima capacidad con inducción forzada.	98
Imagen 67. Fotografía previa al desensamble.	114
Imagen 68. Fotografía del sistema de la válvula de alivio	114
Imagen 69. Fotografía del compresor del turbocompresor.....	115
Imagen 70. Fotografía del sensor MAP nuevo de 2 Bares.....	115
Imagen 71. Fotografía mostrando presión positiva en el manómetro de la izquierda y monitor digital del sensor de banda ancha en el centro.....	116

Imagen 72. Fotografía endoscópica de la corona del pistón dentro del cilindro luego de 2000 kilómetros con el turbocompresor.....	116
---	-----

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mi familia; en especial a mi mamá, Adriana González, por su apoyo incondicional siempre; a mi papá, Gilberto Barrantes, por enseñarme la mayoría de las cosas que sé desde pequeño, y a mi hermanito Víctor Barrantes por aguantarme. También se lo dedico a mi tía abuela Yeri, que ya no está con nosotros, y a mi abuelo José Francisco González, por enseñarme la manera correcta e incorrecta de hacer las cosas.

Agradecimientos

Mi agradecimiento primeramente a Dios por la salud y por la iluminación que recibo de él. Luego a mi madre, Adriana González; a mi padre Gilberto Barrantes y a mi hermano Víctor Barrantes. También les agradezco a mi tutor José Romero y en especial a los siguientes profesores de la escuela de Ingeniería Electromecánica: Carlos Calderón, David Badilla, Adolfo Arias, Gilbert Mora, Geovanny Arce, Feneyer Vallejo, Antonio Tamargo y José Carlos Vargas

Acrónimos

ECU: Engine Control Unit (Unidad de control del motor o Computadora del vehículo)

MAP: Manifold Absolute Pressure (Presión absoluta del colector)

WB: WideBand (Banda Ancha)

NB: NarrowBand (Banda Corta)

O2: Oxígeno

AFR: Air-Fuel Ratio (Relación Aire-Combustible)

IC: InterCooler (Intercambiador de calor)

COR %: Porcentaje de Monóxido de carbono en ralentí

HCR: p.p.m Hidrocarburos por parte por millón en ralentí

CO2R %: Porcentaje de dióxido de carbono en ralentí

LAMB R: Lambda (relación de mezcla de combustible) en ralentí

COA %: Porcentaje de Monóxido de carbono acelerado

HCA p.p.m: Hidrocarburos por parte por millón acelerado

CO2A %: Porcentaje de dióxido de carbono acelerado

LAMB A: Lambda (relación de mezcla de combustible) acelerado

Resumen ejecutivo

Dada a la conciencia ambiental por el entorno y tiempo en el que vivimos, justifico el trabajo de investigación para buscar métodos e implementarlos para así aumentar tanto como la eficiencia del motor como la autonomía. A su vez se detallará el cambio que hubo en sus emisiones, respetando los lineamientos que existen actualmente. Esto beneficiaría tanto por el ahorro de combustible, como para el ambiente por todo lo que esto genera.

Este trabajo de investigación consiste en diseñar e implementar por medio cambios en el software de la computadora adelantando la chispa, inyectores mejores con sus respectivos cambios en el software e implementación de un turbocompresor con su escogencia y diseño respectivo.

Primero se abordará la teoría del adelanto de chispa, luego se explicará como esto puede mejorar el rendimiento en el motor en estudio. Siguiendo, se explicará cómo se implementarán estos cambios y se detallará la diferencia entre el mapa original y el modificado. Luego se demostrarán estos cambios con registros de conducción realizados en vía pública.

Segundo, se abarcará la implementación de inyectores diferentes, con patrón de rocío especial, comparados con los originales. Se detallará los cambios realizados en el software de la computadora y como estos afectan el rendimiento del motor. También se explicará cómo se realiza la implementación de estos y que factores hay que tomar en cuenta.

Tercero, se diseñará el sistema de inducción forzada, y como estos dos últimos factores influenciaron para un beneficio mayor con el uso de un turbocompresor. Principalmente se demostrará la escogencia del tamaño que se considere correcto para un amplio rango de operación. También se detallará como se implementó en el vehículo en específico, con los cambios pertinentes, tanto en el software de la computadora, como cambios mecánicos en el motor. Y se compararán los registros antes y después de la implementación

En este último, se detallará la implementación de sensores necesarios para un correcto funcionamiento del sistema de inducción forzada, incluyendo la utilización de un sensor de presión absoluta de 2 Bares, un sensor de oxígeno de banda ancha (Wideband), y otros artefactos necesarios para su funcionamiento, como un intercambiador de calor, con su respectivo enfriador de aire.

En todos estos pasos, se compararán registros de emisiones antes y después de los cambios realizados en caso de ser posible. A su vez se comparan los registros de consumo de combustible. Y finalmente se detallarán los costos por esta implementación.

Con estos cambios, se podrá aportar en manera específica un lineamiento que se podría seguir para los motores de combustión interna más modernos. También se toma en cuenta en caso de que sea de ayuda mantener motores más viejos pero necesarios para la industria automotriz. Así podremos ayudar tanto con la economía, ahorrando combustible y disminuyendo las emisiones emitidas al ambiente, sin el costo de rediseñar un motor nuevo completamente.

CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA

1.1 Introducción

Actualmente existe una flotilla vehicular en Costa Rica donde se tienen vehículos para mercados estadounidenses, donde estos tienen relativamente un bajo rendimiento, como por ejemplo baja compresión, sistemas de admisión y escape ineficientes y otros factores que esto contribuyen en un mayor consumo.

Tomando esto como punto de partida, hoy en día se puede realizar modificaciones al software de las computadoras de los vehículos, así aumentando su rendimiento y a su vez una mejor autonomía, que se traduce en menores emisiones. Esto beneficiaría al consumidor y al ambiente, a diferencia de comprar un vehículo nuevo, partiendo del que el vehículo usado está en buenas condiciones

De igual manera, estos vehículos fueron los primeros en el cambio del sistema de combustible con la implementación de computadoras más avanzadas, donde no solo se enfocan en el sistema de inyección, sino también en el sistema de ignición, creando así un área donde se podría explotar los cambios de dicho sistema para aumentar la eficiencia, sin tener problemas de detonaciones gracias a otros sistemas que se pueden implementar para evitar daños.

A su vez, se ha notado la implementación de turbocompresores y supercargadores en vehículos actuales, donde estos tienen altos niveles de eficiencia y gran rendimiento. Dado que el vehículo en estudio tiene una gran ventaja por su baja compresión, una computadora que se puede programar y la implementación de sensores extras, es posible crear un motor con inducción forzada sin afectar su confiabilidad y a su vez crear un mayor rendimiento comparado con el motor original.

Por otra parte, esto generaría una mayor potencia a la hora de ser necesario, que contribuye en una mejor conducción, menor esfuerzo a la hora de utilización y más seguridad a la hora de adelantar rápidamente en caso de ser necesario. También se especificará que modificaciones afectan más su potencia y eficiencia comparándose resultados en conducción real.

1.2 Planteamiento del problema

¿Qué métodos y modificaciones benefician al motor de combustión en estudio para mejorar su rendimiento y autonomía?

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Implementar cambios en el motor y computadora para mejorar el rendimiento y autonomía en un Jeep Wrangler, año 1998, con motor de combustión interna de gasolina de 6 cilindros, 4 litros.

1.3.2 Objetivo específico

1. Implementar cambios en el software de la computadora original para adelantar o atrasar la chispa de encendido en regiones de operación necesarias.
2. Implementar cambios en el software de la computadora original para aumentar o disminuir el tiempo de encendido de los inyectores en regiones de operación necesarias.
3. Implementar cambios en el sistema de inyección por medio de reemplazo de inyectores a unos con mejor atomización.
4. Diseñar un sistema de inducción forzada por medio de un turbocompresor, tomando en cuenta las regiones de operación con base al motor original.
5. Implementar el sistema de inducción forzada por medio de un turbocompresor previamente diseñado.
6. Implementar la instalación de un sensor de mezcla de combustible.
7. Comparar datos obtenidos antes y después de las modificaciones realizadas autonomía, rendimiento y costos.

1.4 Justificación

Se demostrará la viabilidad de las mejoras en rendimiento, así también cambios en el software de la computadora del vehículo para un Jeep Wrangler, versión Sport, año 1998, originalmente con un motor de combustión interna de gasolina de 6 cilindros, 4 litros, manteniendo la utilidad del vehículo, la relación costo/beneficio y la facilidad de dichas modificaciones. También se comparará datos dados por la computadora, como tiempo de operación de inyectores, posición del pedal y demás para demostrar su carga y operación en rutas ya definidas.

Los datos por tomar serán el tiempo de operación de inyectores, presión absoluta al colector de admisión, posición del pedal del acelerador, velocidad del motor y demás. A su vez se comparará datos de autonomías comparando distancia recorrida por litros consumidos. Durante la implementación se detalló que piezas fueron removidas del sistema original y que remplazos son dados, sin afectar su seguridad y comodidad al utilizarse diariamente.

Esta implementación se diseñó específicamente para tener un mejor rendimiento a la hora de conducción diaria, mejorando la autonomía y a su vez un mejor desempeño a la hora de utilizar el motor a toda marcha, suponiendo situaciones que se encuentran a diario vivir. Estas situaciones son simuladas y registradas durante el recorrido de este y se compararan resultados con los estándares previos a su modificación.

También se detallará que sistemas fueron instalados para crear una mejor recolección de datos, para así tener más control de las variables, como cascabeleo, mezcla de combustible, presiones y demás. De igual manera estos datos recolectados se implementarán en gráficos de comparación.

A su vez, se comparará que métodos influenciaron en manejo, con operaciones en conducción real, todas registradas en un datalogger, con parámetros estandarizados, utilizándose los mismos sensores en cada registro.

1.5 Antecedentes

Título: More Effective Use of Fuel Octane in a Turbocharged Gasoline Engine Combustion, Knock, Vehicle Impacts.

Autor: Young Suk Jo

Año: 2016

Institución: MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. EE. UU.

Esta tesis se enfoca en su mayoría a la utilización de combustibles de mayor octanaje en vehículos de inducción forzada por medio de turbocompresores. Esto ayuda a evitar el cascabeleo o golpeteo en un motor de combustión interna en diferentes puntos de operación.

Como motor de prueba se tiene un motor marca General Motors modelo EcoTec de segunda generación. Este es un 4 cilindro, 1998 centímetros cúbicos, con una compresión de 9.2:1, inducción forzada por dos turbocompresores, con una potencia máxima de 194 kW a 5300 revoluciones por minuto y 353 Nm a 2500 revoluciones por minuto. También tiene un sistema de inyección directa de combustible y doble árbol de levas con desfase de levas independiente.

En la prueba, se detalla el sistema de admisión, sistema de combustible y demás componentes para estandarización y comparación de resultados. También se utilizará dos sensores de oxígeno para saber la relación de mezcla de combustible, un transductor para la toma de presión dentro de la cámara de combustión entre otros.

Cabe destacar que también se utilizó un sistema de ignición totalmente configurable, donde se utilizan diferentes tiempos de ignición, para saber dónde se encuentra el rendimiento óptimo, sin caer en cascabeleo y dañar los componentes internos. Estas pruebas fueron desde operaciones similares a pocos esfuerzos hasta con la boquilla de admisión completamente abierta.

En sus conclusiones, se demuestra la importancia de la escogencia correcta del combustible con su octanaje indicado para no entrar en un área de cascabeleo, donde en situaciones de mucha carga, con sistemas de inducción forzada, podría perjudicar varias piezas del motor. También se denota con aumento de eficiencia comparado con motores de aspiración natural. Esto también demostró que, al aumentar la compresión, se obtiene ganancias marginales en la eficiencia.

Título: An Investigation of Maximum Brake Torque Timing based on Ionization Current Feedback

Autor: Janek Magnusson

Año: 2007

Institución: Linköping University. Suecia

En este caso, se trata sobre la investigación de máximo torque al freno basado a los diferentes ángulos de encendido, tomando en cuenta las presiones dentro de la cámara de combustión en diferentes puntos de operación. También se toma en cuenta otros parámetros teóricos, como corrientes de ionización en diferentes ángulos basados en el sistema de ignición

El motor por utilizar es un L850, marca SAAB, 2 litros 4 cilindros gasolina, con inducción forzada con turbocompresor. Utilizó dos sistemas de ignición, uno de sistema Mecel de corta duración en el cilindro 1 controlado por la computadora original y otra marca SAAB de larga duración en el cilindro 2. Ambos siendo inductivos.

Primero se detalla cómo se obtiene las presiones en la cámara de combustión, para así detallar donde se obtiene el máximo torque al freno. Luego se varía el ángulo de ignición hasta obtener el máximo torque. Asimismo, se demuestra el máximo torque con el máximo ángulo de avance de chispa.

Luego estudia el frente de la flama, en diferentes fases, para saber los fenómenos que esta causa en la cámara de combustión. Esto afecta las emisiones y potencia en general del motor. Esto a su vez es afectado por la relación de mezcla que el motor tiene. Dado esto, se ajusta a otras variables, como lo son la carga del motor, la temperatura del escape, la velocidad del motor, aditivos de la gasolina y el avance de la chispa.

Finalmente se implementa y se estima para saber los resultados. Dado que el proyecto se estimó con base a un software y luego se comprobó físicamente. Las conclusiones fueron las esperadas, y se tuvo un resultado muy similar la estipulada.

Título: Modeling and Experimental Study of an HCCI Engine for Combustion Timing Control

Autor: Mahdi Shahbakhti

Año: 2009

Institución: University of Alberta. Canadá

Esta tesis se basa en el modelo y experimentación para el estudio del motor de combustión interna con base al control de ignición, y los efectos que esta causa. El control puede ser afectado por cambios en las temperaturas de la mezcla, cambios en sistemas de emisiones como el de recirculación, inyección de agua, y demás. Esto tiene sus ventajas y desventajas a la hora de una combustión completa.

Dado que existen limitaciones con el motor de combustión, esta tesis busca la forma de utilizar ventajas, específicamente el control de la ignición, equiparando sus desventajas, como los son; rangos de operación limitados, mayores emisiones en caso de ajustes incorrectos, cascabeleos y posibles fallos en otros sistemas por este último problema.

Se utilizo dos motores diferentes, con diferentes ángulos de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape. Como primer motor, se tiene uno marca CFR, de 0.622 litros, gasolina, mono cilíndrico, dos válvulas por cilindro y con relación de compresión 12:1. Por otra parte se tiene un motor Ricardo, de 0.447 litros, gasolina, mono cilíndrico, cuatro válvulas por cilindro y con una relación de compresión de 10:1.

Finalmente se estudia como las variaciones de la ignición, reciclamiento de gases, presiones y otros factores, influyen en la potencia entregada. Tambien, estos cambios influyen en el avance máximo de chispa. En conclusión, se nota una mayor sensibilidad al avance cuando existen factores que alteren el octanaje de la gasolina y su mezcla en la cámara de combustión, como lo son temperaturas de admisión, aditivos en la gasolina, y todos estos dependiendo directamente de la carga que se somete el motor.

Título: Study on engine efficiency and performance improvements through hybrid turbocharging assisting

Autor: ALIN-GABRIEL DOBRE

Año: 2014

Institución: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Suecia

Esta tesis abarca sobre métodos para aumentar la eficiencia por medio de un turbocompresor híbrido asistidamente por medio de un sistema neumático y electrónico. Todo esto se basa con cálculos teóricos, por medio de simulaciones y ecuaciones previamente utilizadas.

El método utilizado es por medio de recolección de energía que se desperdicia al momento de manejar, luego se le convierte para transmitir esta energía al turbocompresor. Todo esto se simula por medio de un programa, y se regula por un PID. En la tesis se detallan cuando se recolecta esta energía y cuando se libera, creando ventajas en la conducción, por ejemplo, mayor torque en las salidas, o recolección de energía en compresión y bajadas, y demás escenarios.

En los resultados, se denota un incremento en la eficiencia de los componentes, tanto en el área del turbocompresor, como en el motor. También se detalla que potencia entregar extra al turbocompresor para así no desperdiciar o quedarse sin energía. Todo esto deriva a una mejor conducción diaria, teniendo un mayor torque en la salida, mejor autonomía y menores emisiones.

En conclusión, se recomienda un sistema híbrido asistido electrónicamente, que a su vez tenga un turbocompresor de geometría variable, donde este cambie sus características para así, obtener la mejor eficiencia en todas las áreas de conducción. También se concluye que es necesario un turbocompresor más grande de los utilizados comúnmente para cierto motor estándar, dado que esta asistencia electrónicamente puede generar cuellos de botella en el sistema de escape.

Título: Simulation of turbocharged SI-engines - with focus on the turbine

Autor: Fredrik Westin

Año: 2005

Institución: Royal Institute of Technology. Suecia

Esta tesis trata sobre la simulación de un motor turbocargado, enfocado en la turbina del turbocompresor. También trata un poco de los otros métodos de inducción forzada a un motor de combustión como lo son los supercargadores, para así comparar la diferencia entre estos métodos. En sus cálculos toma en cuenta las ineficiencias del supercargador y las compara con el turbocompresor, donde este último tiene sus amplias ventajas.

Otra área donde se detalla es la diferencia entre turbocompresor sencillos como los de geometría variable y como estos últimos pueden ser óptimos a la hora de diferentes estados de carga, teniendo en si un infinito número de puntos de operación, donde cada uno de estos puede ser variado según la carga del motor y su lugar de operación. Luego también se puntualiza sobre la aplicación de varios turbocompresores secuenciales, para así tener un mayor rango de operación en caso de utilizar dos de diferentes tamaños.

Para la simulación, se utiliza un motor de 4 cilindros, 4 válvulas por cilindro estilo pent-roof, con una potencia máxima de 151kw y 280Nm. Para la inducción forzada se tiene una presión máxima de 1.8 Bar. En esta simulación, se denota varios cálculos para determinar la eficiencia de la turbina, dependiendo de las revoluciones del motor, el caudal que entrega el escape y el flujo que necesita el motor en la admisión. También se especifica las temperaturas de la admisión y el cambio que este produce por el turbocompresor.

Dado que este sistema utiliza una simulación, se puede cambiar una infinidad de variables, incluyendo el tipo de motor, tipo de turbocompresor y demás componentes que demuestran la efectividad de este sistema de inducción forzada.

Título: A Methodology for Turbocharging Single Cylinder Four Stroke Internal Combustion Engines

Autor: Michael Rafael Buchman

Año: 2015

Institución: MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. EE. UU.

Esta tesis abarca la metodología para la implementación de un turbocompresor de un motor de combustión interna de cuatro tiempos de un solo cilindro. Implementa varios dispositivos no muy comunes para el sistema de inducción forzada como un “capacitor” para evitar el retraso en la respuesta del motor, sin embargo, demuestra también varias ventajas en su eficiencia térmica, bajas emisiones y otros detalles más ampliamente abarcados.

El motor utilizado es marca Koop, modelo KD186FA, de 0.418 litros diésel, con una relación de compresión de 18:1. Este motor tiene una potencia de 10 caballos de fuerza y es utilizado a un rango de operación de 3700 rpm dado que es utilizado en generadores de electricidad. Para el turbocompresor, se escogió un Garrett GT0632SZ, utilizado en vehículos con motores de poca cilindrada, como el Tata Super Ace, con un motor de 0.8 litros, 2 cilindros.

El autor describe el funcionamiento del turbocompresor y demuestra en que área del mapa opera, también diseña el capacitor neumático. También implementa varios sensores, como de presión y de temperatura, para así tener mayor control de estos parámetros. A su vez, enfatiza el uso de tacómetro, dado que este motor no trae

En sus conclusiones detalla específicamente como puede solucionarse la problemática de tener poca potencia con motores aspirados naturalmente. También demuestra que este método de inducción forzada con el capacitor neumático tiene sus ventajas comparadas sin este, por ejemplo, un mayor aumento en la densidad total del aire ganado en la admisión

Esta tesis es de gran ayuda dada a sus especificaciones en el sistema de inducción del turbocompresor, y complementa la utilización de un turbocompresor con cambios en parámetros y como son afectados con el ambiente en el que esta.

Título: Módulo de control de avance de encendido

Autor: Fabián Madriz Meza

Año: 2004

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica

Ese antecedente trata sobre una tesis de graduación, que se basa en un módulo sobre control de avance del encendido, cuyo objetivo general es “Desarrollar un prototipo de un módulo de control de avance de encendido para vehículos dotados de sistemas de inyección de gasolina con un solo sensor CKP.”. Esto conlleva estudiar los sensores que ayudan a la computadora electrónica del vehículo a calcular y medir según sea necesario para obtener un rendimiento óptimo.

Los sensores utilizados son principalmente el de posición del pedal (TPS) y Posición del cigüeñal, (CKP). Esto sirve para adelantar o atrasar la chispa de ignición según sea conveniente. Dado que, en este caso, no se modifica el software de la computadora del vehículo, tiene ciertas limitaciones en cuanto otros ajustes que conllevan este método, pero dado a que es modular, se puede remover fácilmente en caso de ser necesario.

Cabe recalcar que se utiliza un método relativamente “poco ortodoxo” dado que interfiere directamente la señal del CKP con la computadora, creando una interfase extra entre esas. También no detalla la ventaja que existe en el adelanto del encendido ni tampoco en el vehículo que podría utilizarse. De igual manera, esto nos ayuda a comprender el funcionamiento del sistema de encendido de un vehículo con computadora electrónica, donde estos parámetros pueden ayudarnos a mejorar el rendimiento, a su vez entender las funciones que hacen cada uno de los sensores involucrados.

En sus recomendaciones detalla que el método utilizado, se debe correlacionar la carga calculada del motor, no solo la utilización del sensor TPS. A su vez detalla la importancia de las pruebas constantes, tanto en calle como en un dinamómetro, para así obtener el mejor rendimiento, tomando los datos en vivo y realizando los cambios necesarios.

Título: Optimización de sistemas de inyección de gasolina

Autor: Enrique Laurent Quiros

Año: 2007

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica

Este antecedente también trata sobre una tesis del tecnológico de costa rica, que se basa en la optimización del sistema de inyección de gasolina. Este se basa en la puesta a punto del sistema de inyección a vehículos que, en su momento, son difíciles de modificar su código en la computadora. Este detalla sobre la importancia que es realizar estos cambios, que incluyen, pero no se limitan a disminución de emisiones, una mayor longevidad del vehículo, un producto donde se puede modificar y crear servicios de puesta a punto personalizados y demás características.

Este método de modificación también es por medio modular, donde el usuario puede crear o modificar tablas ya previamente creadas, donde este módulo toma en cuenta varios sensores, como el sensor de temperatura del refrigerante, sensor de temperatura del aire, medidor de flujo de aire, entre otros. Esto genera varias variables, donde se pueden tomar base para crear una modificación al sistema de inyección personalizado.

En sus conclusiones, se determina que el producto diseñado, no se ha implementado en pruebas reales. También demuestra un éxito en la posible utilización del sistema USB donde sería casi universal la programación con una computadora común. Y se recomienda varios métodos de seguridad como lo son el bloqueo del sistema modular para su protección, un diseño de interfaz más amigable con el usuario con ayudas y guías para la configuración del módulo y la utilización de amplificadores operacionales específicos para el área automotriz.

Esta tesis ayuda también a entender el funcionamiento del sistema de inyección de un vehículo moderno, y a su vez la importancia de estos sensores. También las desventajas de tener un sistema modular, donde es relativamente imposible poder modificar el programa de la ECU original.

Título: Utilización del oxihidrogeno como aditivo para incrementar el desempeño de un motor de combustión interna

Autor: Juan Carlos Sanchez Jalet

Año: 2016

Institución: Universidad de Costa Rica

Esta tesis abarca la utilización del oxihidrogeno para mejorar el rendimiento de un motor de combustión interna común. Esto tiene como objetivo general el aumentar la eficiencia y disminución de emisiones de un motor de combustión interna.

El método utilizado para aumentar la eficiencia es por medio de un aditivo creado artificialmente como lo es el oxihidrogeno, que es administrado al sistema de admisión del motor, donde se mezcla con el aire y combustible. En el caso del vehículo suado, se utiliza un vehículo marca Land Rover, modelo Defender 90, año 1997 motor 2495cc 4 cilindros Diesel, de inducción forzada por medio de un turbocompresor. También un vehículo marca Isuzu, modelo Trooper Wagon, año 1987, motor 2255cc 4 cilindros gasolina, aspirado natural.

En sus resultados, con base al vehículo Land Rover, se demuestra que aumenta su potencia aproximadamente 14% (de 88,27 a 101,09 caballos de fuerza) con la adición del oxihidrogeno en cierta medida ya estandarizada. En el caso de emisiones, el vehículo utilizado es el Isuzu, donde se nota un incremento de emisiones de monóxido de carbono al utilizar el oxihidrogeno en ciertas condiciones específicas, pero a su vez, denota una disminución en otras áreas de operación. Por otra parte, las emisiones de dióxido de carbono, no se denota algún cambio con o sin oxihidrogeno, sin importar su variación. Finalmente, en emisiones de hidrocarburos, los resultados con variados según las revoluciones por minuto del motor, con una disminución en general de las emisiones de un 32% aproximadamente.

En general, esta tesis nos ayuda a comprender como los aditivos pueden mejorar la combustión y la eficiencia del motor. Esto nos ayuda a comprender de mejor manera el funcionamiento del motor de combustión y que variantes nos ayuda a seguir el camino correcto para completar los objetivos.

Título: Herramientas para la toma de decisiones en la gestión de la flota vehicular de la Unidad de Transportes de la Sede Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Autor: María Sofía Morales Fallas

Año: 2018

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica

Como indica la tesis: “La principal fuente antropogénica de CO₂ a nivel global es la producción de energía mediante el uso de combustibles fósiles, siendo este el gas de efecto invernadero (GEI) que más se genera incidiendo directamente en el cambio climático. En el caso de Costa Rica, el sector Transporte genera a un 54% de las emisiones netas de CO₂, y de este porcentaje un 41% proviene de automóviles particulares, siendo un área crítica para mejorar para alcanzar la meta país del carbono neutralidad (Chacón, Jiménez, Jhonny, Sasa, & Blanco, 2012) (Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2016).”

Como objetivos se tienen “establecer la línea base de composición, rendimientos y metodologías de selección de vehículos aplicadas en la flota vehicular de la Sede Central del ITCR. Plantear los criterios de adquisición de vehículos de la Unidad de Transporte. Proponer criterios para seleccionar el tipo de vehículo más eficiente según la ruta a realizar por la Unidad de Transporte.” Donde estos objetivos podrían ser planificados con la introducción de vehículos con motores más eficientes, por medio de modificaciones como las que realizaran en esta tesis.

En una de sus conclusiones se dictaminó que el consumo de combustible de estas unidades varía de 9.17 hasta 14.26 l/100 km, donde el mayor tiene el motor más grande de 4200 centímetros cúbicos, donde podría considerarse ineficiente. Todos estos motores se entienden que no son modificados, tampoco se estima que ventajas tendrán estas modificaciones, pero aportan para tener una referencia de consumo posible en el vehículo de estudio, que cumple con las características de ser doble tracción con motor con cilindrada mayor a 3900 centímetros cúbicos

Cuadro 4.2 Consumo de combustible de la flota según el tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Rendimiento en el consumo de combustible	Capacidad de pasajeros	Consumo por persona
Microbus	14,97 l/ 100km	30	0,499 l/ 100km
Doble Tracción	13,16 l/ 100km	7-9	1,88-1,46 l/ 100km
Buseta	10,88 l/ 100km	15	1,06 l/ 100km
Automóvil	9,17 l/ 100km	5	1,83 l/ 100km
Van	13,18 l/100km	12	1,098 l/ 100km

(Morales Fallas, 2018)

Título: Evaluación Del Comportamiento De Un Motor De Combustión Interna De Encendido Por Compresión Con Mezclas De Biodiésel Con Diésel

Autor: Eduard Cordero Navarro

Año: 2020

Institución: Universidad de Costa Rica

Esta tesis abarca más que todo la utilización de un biocombustible como forma para aportar de forma amigable con el ambiente, otros métodos de utilización de combustibles. Y como plantea en su objetivo “Determinar el comportamiento del consumo de combustible de un motor de combustión interna con diferentes mezclas de biodiésel, para su análisis con respecto al comportamiento del motor usando diésel al 100%. Determinar el comportamiento de la potencia de un motor de combustión interna con diferentes mezclas de biodiésel, para su análisis con respecto al comportamiento del motor usando diésel al 100%. Determinar el comportamiento del torque de un motor de combustión interna con diferentes mezclas de biodiésel, para su análisis con respecto al comportamiento del motor usando diésel al 100%.” Se puede rescatar el análisis y recolección de datos para la utilización en esta tesis.

Primero se detallan las características del motor en estudio, luego se estiman algunas medidas, como presión en compresión, y se detallan otras específicas, como viscosidad del aceite, carrera del pistón, diámetro del cilindro, entre otros. También se consideran factores de corrección, dado que este motor se opera a altura, donde esto se ve afectado dada a la diferencia de densidades en el aire comparándose entre el nivel del mar y la altura donde se realiza la prueba.

Dado que este motor ya está diseñado con turbocompresor, no se aporta muchas especificaciones en su instalación, pero si aporta en la recolección de datos. Esta recolección sería de gran importancia para compararse entre los diferentes lugares donde se opera el motor. También hace un gran aporte en la importancia de la utilización de métodos de medición de potencia como dinamómetros, para la fácil recolección de datos y su comparación, manteniendo su repetibilidad.

Título: DISEÑO PARA LA CONVERSIÓN DE UN JEEP WRANGLER 1998 DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A ELÉCTRICO

Autor: David Barrantes Gonzalez

Año: 2020

Institución: Universidad Internacional de las Américas

Este trabajo de investigación fue principalmente un diseño de la conversión del mismo vehículo en estudio a eléctrico, tomando en cuenta factores como potencia, autonomía y otros factores de diseño como posicionamiento de baterías y demás. Esto fue con base teórica, y se tomaron datos reales.

Algunos de estos datos son la autonomía del vehículo con el motor de combustión, su potencia teórica y pesos. Esta autonomía recolectada puede aportarnos una guía o base para partir en qué condiciones se encontraba el vehículo y su consumo, según la distancia. Estos datos son tabulados de la siguiente manera:

Fecha	Precio ¢/l	Mi	Litros medidos	l/Mi	l/km
1 de octubre de 2019	609	73,7	32,841	0,446	0,277
11 de octubre de 2019	597	98,3	25,125	0,256	0,159
23 de octubre de 2019	597	77,1	32,909	0,427	0,265
11 de noviembre de 2019	617	105,9	32,415	0,306	0,190
22 de noviembre de 2019	617	90,1	29,144	0,323	0,201
4 de diciembre de 2019	618	91,6	32,362	0,353	0,219
20 de diciembre de 2019	618	126,2	32,362	0,256	0,159
21 de enero de 2020	604	90,8	33,112	0,365	0,226
1 de febrero de 2020	623	123,7	32,102	0,260	0,161
13 de febrero de 2020	623	88,5	32,102	0,363	0,225
25 de febrero de 2020	623	105,9	32,102	0,303	0,188
11 de marzo de 2020	583	119,9	34,305	0,286	0,178
Promedios	611	99,31	31,74	0,329	0,204

Tabla 16. (Barrantes Gonzalez, 2020)

A su vez, podemos tomar como referencia otros datos importantes como la potencia del motor de combustión original, pesos y otras características. Este antecedente en especial aporta datos valiosos para el inicio del diseño e implementación como base.

1.6 Proyecciones y alcances

En esta tesis se detallará como se implementaron los cambios en etapas, tanto en el software, por medio de una compañía especializada en estos, utilizando su producto tanto en software como hardware. También se detallará que cambios se hicieron en el sistema de inyección, como inyectores, son sus respectivos datos. A su vez de detallar que cambios fueron necesarios para la implementación de un turbocompresor, tanto en el motor, como en el software de la computadora y sistema de escape. Luego se demostrará la implementación de sensores necesarios para el correcto funcionamiento. Y finalmente se compararán registros tomados en su conducción.

1.7 Limitaciones

- Estos cambios ya fueron implementados específicamente en el vehículo en estudio.
- Se tomará en cuenta solo los cambios realizados actualmente en el vehículo.
- Actualmente existen ajustes mínimos necesarios para un funcionamiento normal. Se está utilizando una programación segura y conservativa para evitar problemas mecánicos por mala implementación del software.
- No se abarcará muy a fondo sobre cálculos puros sobre el motor de combustión interna original. Solo se detallará la escogencia del turbocompresor y comparaciones entre diferentes tipos.
- En caso de desviación sobre algún dato, se aproximará al valor que considere razonable.
- Para las mediciones de emisiones, se confiará que las máquinas de RTV estén calibradas correctamente.
- Se estimará la ganancia de potencia por no tener dinamómetro accesible durante los cambios.
- Dada a la rapidez de la implementación, no se tomaron datos a largo plazo entre etapas implementadas.
- Se tiene como base un vehículo que se usa diariamente donde no es posible realizar pruebas que dañen la integridad del motor, como avance de ignición agresivo.

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Motor de combustión interna

“En un motor de combustión interna se introducen aire y combustible. En los motores de encendido por chispa la mezcla de aire y combustible se preparaba antiguamente en el carburador y es luego conducida al cilindro, ahora es por medio de inyectores, lo que permite un ahorro de combustible y un mejor aprovechamiento de este; en los motores de encendido por compresión se realiza directamente en el cilindro, donde el combustible se inyecta después de haber introducido y comprimido el aire. La mezcla comprimida en la cámara de combustión se transforma, por efecto de la combustión, en vapor de agua (H_2O), bióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N). El nitrógeno, gas inerte contenido en el aire, no interviene en la combustión. El vapor de agua producido en la combustión se mantiene y se comporta como un gas permanente. Entre los otros productos de la combustión se encuentran partículas de otros gases tales como: monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), metano (CH_4) y oxígeno (O_2), cuando la combustión es incompleta. La cantidad de oxígeno que participa en el proceso está en razón directa del exceso de aire introducido con respecto al necesario para la combustión. En consecuencia, el fluido de trabajo está formado inicialmente por el aire y el combustible y después por el conjunto de gases producidos durante la combustión. Como es natural y evidente, su composición química varía en el curso del ciclo de trabajo.” (Rafael Morales & Hernández Guzmán, 2014). En el caso del vehículo en estudio, el motor es de 4.0 litros, 6 cilindros en línea e inyección electrónica multipunto y aspiración natural.

2.1.1 Relación de compresión

“La relación de compresión es un número que indica el número de veces que es mayor el volumen que ocupa la mezcla al final de la admisión (pistón en PMI), respecto al volumen al final de la compresión (pistón en PMS).” (Secundino, 2011) En el caso del motor en estudio, este cuenta con una relación de compresión de 8.8:1

2.2 Sistema de inyección de combustible:

2.2.1. Mezcla de combustible

“La riqueza de la mezcla es la relación entre el dosificado real y el de la relación estequiométrica. Se representa mediante el coeficiente lambda (λ).” (Sánchez, 2011)

“Dependiendo de la proporción entre el aire y la gasolina existen tres tipos de mezcla...:

- Mezcla estequiométrica. Corresponde a una relación aproximada en peso de 1:15, es decir, 1 gramo de combustible por cada 15 gramos de aire

- Mezcla rica. Existe defecto de aire. La proporción de gasolina respecto al aire es mayor que en una mezcla estequiométrica. La máxima potencia es dada para la relación de mezcla de entre 12 y 13.

- Mezcla pobre. Existe exceso de aire. La proporción de gasolina respecto al aire es menor que en una mezcla estequiométrica. Mínimo consumo específico para una relación de entre 15 y 16,5.” (Sánchez, 2011)

2.2.2. Octanaje

“El poder antidetonante mide la resistencia a la detonación de un carburante. Esta resistencia se mide por el número de octanos (RON - Research Octane Number) que indica la actitud del combustible para soportar, sin detonación, compresiones elevadas. El número de octanos de un combustible (NO) depende de su composición química. Los hidrocarburos más resistentes a la detonación son los hidrocarburos aromáticos. Por lo tanto, cuanto más elevado sea el número de octanos de un combustible, mayor será su capacidad para resistir la detonación y más alta podrá ser la relación de compresión del motor. La potencia y el consumo específico del motor dependen de la relación de compresión y, por tanto, del índice de octanos del combustible. El NO de una gasolina se obtiene por comparación del poder antidetonante de la misma con el de una mezcla de isoctano (C_8H_{18}) y heptano (C_7H_{16}). Al isoctano se le asigna un poder antidetonante de 100 y al heptano, de 0. Por ejemplo, una gasolina de 97 octanos se comporta, en cuanto a su capacidad antidetonante, como una mezcla que contiene el 97% de isoctano y el 3% de heptano. El NO de los carburantes se puede elevar añadiendo pequeñas dosis de sustancias antidetonantes. Las más utilizadas son a base de plomo tetraetilo o de plomo tretametilo, sustancias muy tóxicas para el organismo. Además, el plomo deteriora muy rápidamente las sondas lambda y los catalizadores, componentes que se utilizan para eliminar las emisiones contaminantes en el escape.” (Sánchez, 2011)

2.2.3. Sensor de Oxígeno:

“La sonda lambda (también llamada sensor de oxígeno) es un componente electroquímico muy importante en el sistema de inyección de un vehículo y tiene una influencia fundamental sobre el consumo de combustible. La sonda lambda se encarga de la regulación correcta del suministro de aire y combustible al motor, midiendo el contenido residual de oxígeno en el gas de escape y determinando de este modo si la mezcla es estequiométrica, rica o pobre.” (Sánchez, 2011). En este caso se está utilizando dos sensores de oxígeno, uno para uso de la unidad de control y otro para medición más exacta

2.2.3.1 Sonda lambda de circonio (narrowband o banda corta)

“Se trata de una sonda lambda convencional la cual genera una tensión en su célula de medición correspondiente a la diferencia de oxígeno entre el aire exterior y los gases de escape utilizando para ello un elemento cerámico especial (dióxido de circonio, ZrO_2) incluido en una carcasa que sirve para la fijación y para protegerla contra efectos mecánicos” (Sánchez, 2011). En este caso se está utilizando el sensor original del vehículo, marca NTK, delante del catalizador

2.2.3.2 Sonda lambda de banda ancha (wideband o banda ancha)

“Las sondas lambda de banda ancha o sondas lineales con ventana lambda de medición ampliada son las más utilizadas actualmente. Miden el contenido de oxígeno en los gases de escape de forma muy precisa. La señal de salida representa el valor lambda y es proporcional al contenido residual de oxígeno restante en los gases de escape.” (Sánchez, 2011). En este caso se están utilizando un sensor independiente de la computadora, relojera marca AEM y sensor marca BOSCH modelo 4.9 LSU

2.2.4 Inyectores de combustible:

“Los inyectores inyectan el combustible en los tubos de admisión de los cilindros delante de las válvulas de admisión del motor.” (Sánchez, 2011)

“Tienen la misión de pulverizar el combustible en el colector de admisión mediante los movimientos oscilantes de su aguja, cuando es sometida a una presión determinada.” (Sánchez, 2011). Los inyectores originales son marca Siemens de un solo orificio de 223cc aproximadamente. Estos serán cambiados por otros de la marca BOSCH de 4 orificios de 450cc aproximadamente

2.2 Sistema de encendido:

“El circuito de encendido ... utilizado en los motores de gasolina es el encargado de hacer saltar una chispa eléctrica en el interior de los cilindros, para provocar la combustión de la mezcla

aire-gasolina en el momento oportuno. Para encender la mezcla es necesaria una energía que produzca la chispa eléctrica. Si la energía de encendido disponible es insuficiente, no se producirá el encendido. Por este motivo, es necesario que haya una energía de encendido suficiente para que la mezcla aire-combustible pueda inflamarse incluso cuando las condiciones exteriores no son favorables. En este caso, basta que una pequeña porción de mezcla inflamable roce la chispa para que empiece la combustión del combustible. La bujía es el elemento encargado de crear la alta tensión para provocar la chispa eléctrica en el interior de cada uno de los cilindros del motor.” (Sánchez, 2011)

Actualmente se cuenta un sistema de distribución de chispa, con una bobina controlada por la computadora del vehículo. Esta es programable y se estudia en su estado original y modificado.

2.2.1 Avance del encendido:

“Desde que salta la chispa hasta que se alcanza la presión máxima de combustión, transcurre un tiempo debido a la velocidad de la propagación de la llama y el tiempo que tarda en producirse la expansión de los gases debida a la reacción química producida por el incendio de la mezcla. Este tiempo varía en función de la forma de la cámara de combustión, temperatura de la mezcla, riqueza de la misma y presión en el interior de dicha cámara. El ángulo recorrido por el motor desde que se produce el salto de chispa hasta que se produce el punto de encendido varía en función de la velocidad de giro del mismo, por lo que necesitaremos avanzar el encendido a medida que aumentan las revoluciones. La chispa de encendido debe saltar con cierta antelación con respecto al PMS ... para que la presión de combustión alcance su valor máximo, poco después de que el pistón inicie la carrera descendente una vez superado dicho PMS. Este punto óptimo depende de las características constructivas del motor (tamaño de biela, diámetro del pistón, tamaño de la muñequilla del cigüeñal, etc.). El valor oscila entre 0 y 25° aproximadamente según las características del motor (cilindrada, grado de compresión, normas antipolución, etc.).” (AutoAvance, 2012)

2.2.2 Detonación:

“La detonación es un proceso espontáneo en el que la mezcla alojada en la cámara de combustión explosiona en lugar de quemarse. La detonación ... se produce cuando el frente de llama en el cilindro se propaga y la dilatación de los gases resultantes de la combustión en la cabeza comprime tanto a los gases que se encuentran en la culata que llegan a explotar. La consecuencia es un exceso de presión en el interior de la cámara de combustión, que provoca un ruido

característico denominado picado” ... “Dependiendo de la consistencia del mismo puede causar daños de consideración a los pistones de los cilindros. La detonación es causada por un excesivo calentamiento de la mezcla por depósitos de carbonilla en la culata, porque el número de octanaje del combustible es demasiado bajo, porque el encendido es muy adelantado o por una temperatura muy alta de los gases en la admisión. Se evita con las acciones contrarias, es decir, limpiando la carbonilla de la culata, utilizando combustible de octanaje más alto, retrasando el encendido o reduciendo la temperatura de los gases.” (Sánchez, 2011)

2.2.3 Autoencendido:

“El autoencendido es la inflamación de la mezcla por culpa de un punto demasiado caliente en la cámara de combustión. Más tarde, además, salta la chispa, por lo que se crean dos frentes de llama” ... “Este proceso produce el aumento de temperatura y presión. Normalmente, el autoencendido lo provocan depósitos de materia en las válvulas o restos de materia metálica de la cámara, principalmente un electrodo de la bujía.” (Sánchez, 2011)

2.3 Inducción Forzada o sobrealimentación

“La sobrealimentación consiste en introducir aire previamente comprimido para aumentar su presión y conseguir mejorar el rendimiento volumétrico.” (Secundino, 2011)

2.2.2. Supercargador o compresor volumétrico:

“Los compresores volumétricos son accionados mediante el cigüeñal, normalmente por una correa dentada o engranajes, pudiendo conseguir de 10 000 a 15 000 rpm. Se caracterizan por hacer circular el aire a mayor velocidad de la que proporciona la presión atmosférica, creando una acumulación de aire en el colector de admisión y, consecuentemente, una sobrepresión en el mismo.” ... “Su principio de funcionamiento se basa en aspirar aire e introducirlo en una cámara que disminuye su volumen. Está compuesto por dos rotores ..., cada uno de los álabes, con una forma de sección parecida a la de un ocho. Los rotores están conectados por dos ruedas dentadas y giran a la misma velocidad en sentido contrario, produciendo un efecto de bombeo y compresión del aire de forma conjunta.” (Sánchez, 2011)

2.2.3. Turbocompresor:

“El turbocompresor es una bomba de aire diseñada para operar con la energía que normalmente se pierde en los gases de escape del motor. Estos gases impulsan la rueda de turbina (lado escape) que va acoplada a la rueda de compresor (lado admisión). Cuando giran, aportan un gran volumen de aire a presión, aumentando la presión en las cámaras de combustión del motor.”

... “El turbocompresor es el más utilizado porque no consume potencia del motor y puede girar a más de 100 000 rpm.” (Sánchez, 2011). En este caso se está utilizando un turbocompresor T04E de maxspeedingrods.

2.4 Intercambiador de calor o “Intercooler”:

“Es un sistema compuesto por un intercambiador de calor en el que se introduce el aire calentado que sale del rodete compresor para enfriarlo antes de introducirlo en los cilindros del motor. El aire que incide sobre este intercambiador o radiador proviene del exterior durante la marcha del vehículo y consigue rebajar la temperatura del aire que pasa por el interior del intercooler unos 40 oC (el aire de admisión en motores turboalimentados puede alcanzar hasta 100 oC). Por tanto, se trata de un intercambiador de calor aire/aire. Con él se consigue aumentar la potencia y el par del motor debido al aumento de la masa de aire que entra en el cilindro como consecuencia de la subida de densidad del aire cuando este enfría. Otros efectos positivos resultantes de la utilización del intercooler son la disminución del consumo y de las emisiones contaminantes. En ciertos motores el intercambiador es de tipo aire/agua, es decir, al aire se le fuerza a pasar por un radiador por el que circula el agua del sistema de refrigeración.” (Sánchez, 2011) En este caso se utiliza un intercooler enfriado por agua, con un intercambiador de calor delante del condensador del aire acondicionado.

2.5 Emisiones

2.5.1 Monóxido de Carbono

“El monóxido de carbono es un producto de la combustión incompleta y ocurre cuando el carbono en el combustible se oxida sólo parcialmente. El monóxido de carbono se adhiere con facilidad a la hemoglobina de la sangre y reduce el flujo de oxígeno en el torrente sanguíneo ocasionando alteraciones en los sistemas nervioso y cardiovascular” (INECC, ND)

2.5.2 Dióxido de Carbono

“El bióxido de carbono no atenta contra la salud pero es un gas con importante efecto invernadero que atrapa el calor de la tierra y contribuye seriamente al calentamiento global.” (INECC, ND)

2.5.3 Hidrocarburos no quemados:

“Las emisiones de hidrocarburos resultan cuando no se quema completamente el combustible en el motor. Existe una gran variedad de hidrocarburos emitidos a la atmósfera y de

ellos los de mayor interés, por sus impactos en la salud y el ambiente, son los compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos compuestos son precursores del ozono y algunos de ellos, como el benceno, formaldehído y acetaldehído, tienen una alta toxicidad para el ser humano.” (INECC, ND)

2.5.4 Óxidos de Azufre

“El SO₂ es un gas incoloro de fuerte olor, que se produce debido a la presencia de azufre en el combustible. Al oxidarse en la atmósfera produce sulfatos, que forman parte del material particulado. Este compuesto es irritante para los ojos, nariz y garganta, y agrava los síntomas del asma y la bronquitis. La exposición prolongada al bióxido de azufre red” (INECC, ND)

2.5.5 Óxidos de nitrógeno:

“Bajo las condiciones de alta temperatura y presión que imperan en el motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire reaccionan para formar monóxido de nitrógeno (NO), bióxido de nitrógeno (NO₂) y otros óxidos de nitrógeno menos comunes, que se conocen de manera colectiva como NO_x. Los óxidos de nitrógeno, al igual que los vehículos automotores como fuente de emisión 29 hidrocarburos, son precursores de ozono. Así mismo, con la presencia de humedad en la atmósfera se convierten en ácido nítrico, contribuyendo de esta forma al fenómeno conocido como lluvia ácida. La exposición aguda al NO₂ puede incrementar las enfermedades respiratorias, especialmente en niños y personas asmáticas. La exposición crónica a este contaminante puede disminuir las defensas contra infecciones respiratorias.” (INECC, ND)

2.5.6 OBD:

“OBD (On Board Diagnostics) es un sistema de diagnóstico a bordo en vehículos (coches y camiones). Actualmente se emplean los estándares OBD-II (Estados Unidos), EOBD (Europa) y JOBD (Japón) que aportan un monitoreo y control completo del motor y otros dispositivos del vehículo.” (obd2-elm327, s.f)

2.5.7 OBDII:

“OBD II es la segunda generación del sistema de diagnóstico a bordo, sucesor de OBD I. Alerta al conductor cuando el nivel de las emisiones es 1.5 mayor a las diseñadas. A diferencia de OBD I, OBD II detecta fallos eléctricos, químicos y mecánicos que pueden afectar al nivel de emisiones del vehículo. Por ejemplo, con OBD I, el conductor no se daría cuenta de un fallo químico del catalizador. Con OBD II, los dos sensores de oxígeno, uno antes y el otro después del catalizador, garantizan el buen estado químico del mismo. El sistema verifica el estado de todos los sensores involucrados en las emisiones, como por ejemplo la inyección o la entrada de aire al

motor. Cuando algo falla, el sistema se encarga automáticamente de informar al conductor encendiendo una luz indicadora de fallo (Malfunction Indication Lamp (MIL), también conocida como Check Engine o Service Engine Soon). Para ofrecer la máxima información posible para el mecánico, guarda un registro del fallo y las condiciones en que ocurrió. Cada fallo tiene un código asignado. El mecánico puede leer los registros con un dispositivo que envía comandos al sistema OBD II llamados PID (Parameter ID).” (obd2-elm327, s.f)

2.6 Revisión técnica Vehicular de Costa Rica

“Somos una empresa costarricense, de capital nacional y extranjero, a cargo de la Revisión Técnica Vehicular (RTV) en Costa Rica desde 2002.

El objetivo más importante de sus operaciones radica en la protección a la vida y esto se logra desde distintas áreas como la seguridad vial y la protección al ambiente.

Actualmente, Riteve SyC es una empresa reconocida por la seriedad, responsabilidad, objetividad, transparencia y credibilidad de su servicio.” (Riteve SyC , 2021) Este ente regulador será la que se tomará en cuenta la medición de emisiones con base a las pruebas anuales realizadas. También se verificará el cumplimiento de los requerimientos de las emisiones y sistemas relacionados.

2.7 Términos financieros

2.7.1 VAN

“El valor presente neto (VAN) es la diferencia entre el valor presente de las entradas de efectivo y el valor presente de las salidas de efectivo. El VAN compara el valor de un euro hoy en día con el valor de ese mismo euro en el futuro, teniendo en cuenta la inflación y los retornos.

El análisis de VAN es sensible a la confiabilidad de los flujos de efectivo futuros que una inversión o proyecto producirá y se utiliza en la presupuestación de capital para evaluar la rentabilidad de una inversión o proyecto.

Si el VAN de un proyecto prospectivo es positivo, el proyecto debe ser aceptado. Sin embargo, si el VPN es negativo, el proyecto probablemente debería rechazarse porque los flujos de efectivo también serán negativos.” (Directivos, 2018)

2.7.2 TIR

“La tasa interna de retorno (TIR) es la tasa de descuento que hace que el valor presente neto (VAN) de un proyecto sea cero. En otras palabras, es la tasa de rendimiento anual compuesta esperada que se obtendrá en un proyecto o inversión.

Si una inversión inicial dada tiene un TIR del 16 %, eso significaría que es igual a ganar una tasa de crecimiento anual compuesta del 16 %, en términos puramente económicos.

Una vez que se determina la tasa interna de rendimiento, por lo general se compara con la tasa o el coste de capital de una empresa. Si el TIR es mayor o igual al coste del capital, la compañía aceptaría el proyecto como una buena inversión, de otro modo, la iniciativa sería seguramente rechazada.

La tasa interna de rendimiento se usa para analizar las inversiones en capital privado y capital de riesgo, lo que implica múltiples inversiones en efectivo a lo largo de la vida de una empresa y un flujo de efectivo más o menos importante.” (Directivos, 2018)

Capítulo III: Marco metodológico

En este capítulo se detalla la metodología de investigación en aspectos como el enfoque y el tipo de investigación, las fuentes de información, las variables, las técnicas de recolección de datos y los instrumentos por utilizar para recolectarlos. De esta manera se mantendrá un orden generalizado a la hora de interpretar y analizar los datos.

Como dice Barrantes, “el marco metodológico es el “corazón” de la investigación, o sea, está bombardeando la “sangre” a todo el “cuerpo” del documento y ayudará a producir “los alimentos” que le facilitarán crecer y vivir” (Barrantes, 2002). En general, esto ayudará a alcanzar el objetivo de la investigación.

3.1 Enfoque de investigación

La presente investigación es de enfoque mixto dado que se obtienen datos de manera teórica y se implementara en práctica, con su comportamiento, y se generalizan resultados; esto por examinarse los hechos y por tener un diseño flexible y establecerse objetivos generalizados, pero con resultados específicos. Se enfocará más que todo en la implementación de los cambios respectivos, y con gran detalle el diseño e implementación del turbocompresor.

3.2 Método de investigación

Se utilizará el método de investigación correlacional.

Como dicen Hernández *et al*:

"Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. En ocasiones sólo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia" se ubican en el estudio vínculos entre tres, cuatro o más variables. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014)

El método de investigación serán el análisis y la recolección de datos del motor y del manual de servicio originales del vehículo. Dado que será en parte teórico y físico se enfocará en la implementación de los cambios. También se compararán datos antes y después de la implementación de los cambios realizados, para así demostrar más fácil el resultado.

3.3 Fuentes de información

La información será tomada de las siguientes fuentes:

3.3.1 Tesis relacionadas con el tema

En este caso las que se utilizarán están brevemente explicadas en los antecedentes.

3.3.2 Manual de servicio original del vehículo por convertir

De este manual se recolectarán datos importantes como medidas, diagramas eléctricos, diagramas mecánicos, y demás información clave a la hora de elaborar el diseño e implementación.

3.3.3 Especificaciones del turbocompresor o similares a este

Estos datos son sumamente importantes para detallar los rangos de operación teóricos de turbocompresor, para así saber las relaciones de presión a las que se operará el motor.

3.3.4 Manual de operación de la computadora original

Este trae la información clave para la hora de entender e implementar cambios en el software y saber qué ventajas tiene utilizar este sistema.

3.3.5 Libros relacionados con motores de combustión y sistemas de inducción forzadas

Existe una amplia y generalizada información sobre implementaciones, pero se utilizarán solo fórmulas generales para la utilización específica del vehículo por diseñar e implementar.

3.3.6 Páginas de internet de los fabricantes

Esta fuente es de suma importancia porque tiene información de características generales, además del precio de los dispositivos.

3.4 Variables o unidades de análisis

Las variables son de tipo cualitativo por generar confianza y venir de datos medibles. Algunas de las variables o unidades de análisis serán:

- Diferencial de potencia: Voltios (V)
- Flujo eléctrico: Amperios (A)
- Potencia eléctrica: Watts (W)
- Potencia mecánica: Kilowatts (kW) o Caballos de fuerza (HP)
- Torque: Newton metro o libras pie (Nm o Lbft)
- Moneda estadounidense: Dólar (\$) o moneda costarricense colones (₡)
- Presión: Bares, kilopascales o libras por pulgada cuadrada (BAR, kPa o PSI)
- Flujo: Litros por minuto o galones por minuto (L/min o GPM)
- Distancia: Metros (m) y kilómetros (km)
- Velocidad angular: Revoluciones por minuto (RPM)

3.5 Instrumentos

Algunos de los instrumentos por utilizar serán:

- AutoCAD. Para el diseño del colector de escape.
- HPTuners MPVI2. Hardware para la recolección de datos y cambios de parámetros.
- HPTuners VCM Suite (Beta): Software para cambios de parámetros con el MPVI2.
- HPTuners VCM Scanner (Beta): Software para Registro de datos con el MPVI2.
- Microsoft Paint. Para la modificación y creación de diagramas.
- Cinta métrica. Para la medición de longitudes.
- Cámara fotográfica. Para la recolección de imágenes.
- Odómetro del vehículo. Para la recolección de distancias recorridas a la hora de calcular el consumo.
- Microsoft Excel. Para el uso de memoria de cálculo.
- Soldadora Lincoln Electric MP210. Para soldar piezas necesarias.
- Herramientas manuales. Llaves, juego de cubos, desatornilladores, brocas y demás.
- Herramientas eléctricas como taladro, esmeril, trozadora y demás.
- *Jeep Wrangler sport 1998*. Es el vehículo en estudio para el que se hará el diseño.

3.6 Procesos para la recolección y el análisis de datos

La recolección y el análisis de datos se harán por medios comunes como lápiz, papel y Excel. Dado que existe complejidad para la toma de medidas se estimarán algunas. En caso de no poderse estimar se buscarán en internet y en los manuales respectivos los datos necesarios.

Esta recolección empezará con un análisis del manual de servicio del vehículo para investigar las características propias de los sistemas por analizar, como el motor de combustión. También se utilizará el manual de la ECU para comprender que factores y limitantes tenemos. Luego se hará una comparación con los dispositivos mecánicos que se cambiaran como los inyectores de combustible. Inmediatamente se detallará como la información de estos dispositivos serán necesarios para la calibración correcta del software de la ECU.

Lo siguiente sería comparación de registros antes y después de las modificaciones realizadas por medio del datalogger y su software. Se tomarán datos que tengan una gran similitud para evitar errores de variables.

Finalmente se detallará el diseño e implementación del turbocompresor y realizar los cálculos respectivos para encontrar el correcto. De igual manera se detallará los cambios

respectivos en el software de la ECU y a su vez se volverá a registrar los datos por medio del datalogger con las mismas precauciones dichas anteriormente.

Capítulo IV. Diseño

4.1 Diagnóstico

Primero se recolectarán los datos de fuentes como el manual de servicio del vehículo y computadora, que incluye especificaciones del motor de combustión, computadora, sistema de inyección, sistema de ignición. A su vez se extraerá el software original, previo a modificaciones y registros de conducción cotidiana. Luego se detallará paso por paso los cambios realizados primeramente en el sistema de ignición e inyección. Después se demostrará la comparación de inyectores y su remplazo por otros, comparándose entre los originales y los nuevos, a su vez con registros de la utilización de estos. Finalmente se detallará el diseño e implementación del turbocompresor con registros y modificaciones respectivas tanto al motor como al software de la computadora.

4.2 Desarrollo

4.2.1 Características originales del vehículo

4.2.1.1 Motor de combustión

Este vehículo en estudio tiene un motor de combustión interna de 4 litros, seis cilindros con una potencia de 190 caballos de fuerza a 4.600 revoluciones por minuto y 235 libra pies de torque a 3.200 revoluciones por minuto. (CUPLER, s.f)

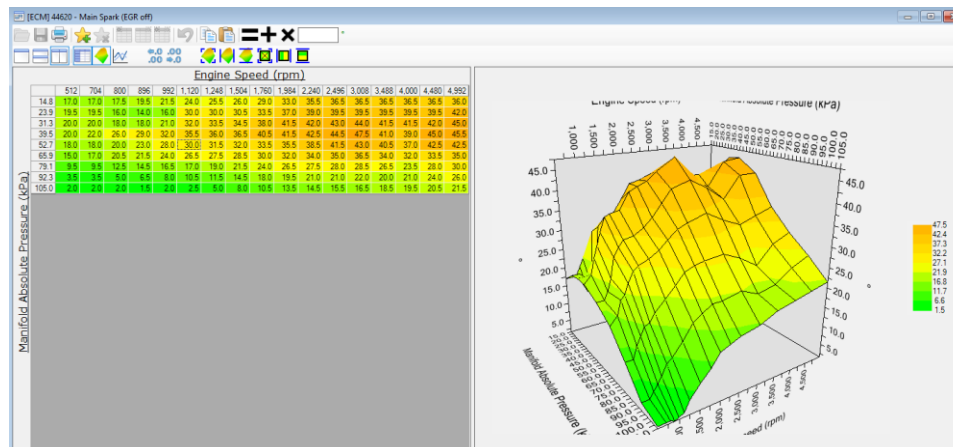
4.2.1.1.1 Sistema de ignición

Consta de un sistema con distribuidor de seis postes con uno central para la bobina de ignición, que incluye el sensor de posición del árbol de levas. Este distribuye la chispa al tiempo que la computadora tenga programado. La bobina consta de un solo borne de alto voltaje, donde se controla por medio del tiempo con conexión a tierra entregada por la computadora. La bobina de ignición es marca Toyodenso con una resistencia del primario entre 0.95 a 1.2 ohmios y de secundario de 11.3 a 13.3 kilo ohmios

Las bujías son Champion RC12LYC, una por cilindro, con una holgura de 0.035 pulgadas como dicta fabrica.

Para la tabla de ignición original se puede visualizar el avance de la chispa en la Imagen 1

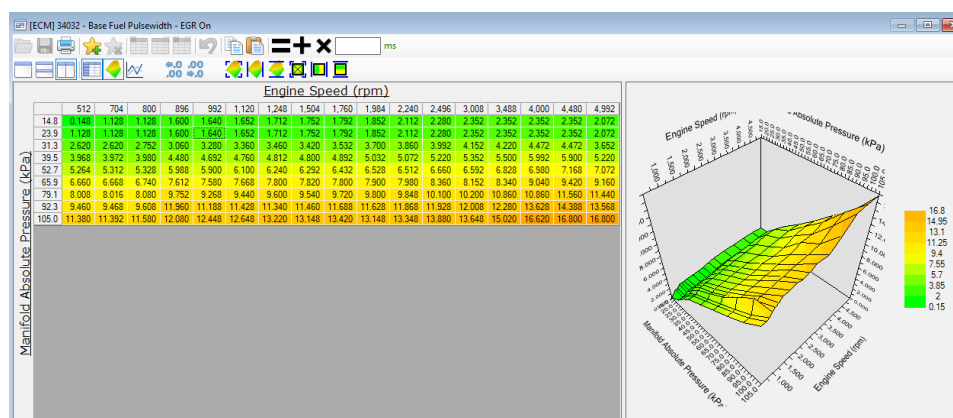
Imagen 1. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición original



4.2.1.1.2 Sistema de inyección de combustible

Este consta de un riel con seis inyectores, marca Siemens DEKA, modelo 53030778. Sus especificaciones son a 3 bares un 243.8 cc/min. Con una resistencia de 12 ohmios (Injector Planet, s.f). Estos tienen solo un orificio de salida y operan a una presión de 3.39 Bares. Estos inyectores operan de forma secuencial, respetando el orden de encendido y el tiempo de apertura según la calibración de fábrica (Imagen 2).

Imagen 2. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible original



4.2.1.1.3 Sistema de admisión

Constituye de un colector de aluminio a cada cilindro que contiene el riel de inyectores, boquilla de admisión, sensor de temperatura de admisión, y otros accesorios de bronce para el booster del freno, sistema de emisiones y sistema de aire acondicionado para el accionamiento de las válvulas.

4.2.1.1.4 Sistema de escape

Es un colector de acero, con tubería de 30 milímetros para cada cilindro y se colecta a un adaptador a 55 milímetros. Luego pasa por tubería debajo del vehículo de 55 milímetros de diámetro y se conecta al catalizador. Luego pasa por tubería y se conecta al silenciador con un tamaño aproximado de 110 milímetros de alto por 500 milímetros de ancho por 220 milímetros de largo. Luego pasa por más tubería y sale a la parte posterior del vehículo al lado del copiloto.

4.2.1.1.5 Sensores originales

Para el sistema de escape y emisiones se tiene dos sensores de banda corta o “narrowband”, marca NTK modelo 23099. Estos se ubican antes del catalizador, conocido como “upstream” y después del catalizador, llamado “downstream”. El de “upstream” revisa la mezcla de combustible que tiene como objetivo una mezcla estequiométrica de 14.7 partes de aire por una de combustible, donde se demuestra con un voltaje de 0.7 voltios y le dicta a la computadora que tan cercano lo tiene al punto óptimo de operación. El sensor en “downstream” lo que hace es comparar su medida con el “upstream” para saber la condición del catalizador. No tiene función en el control del motor.

En la admisión se tiene un sensor MAP o de presión de admisión al colector, de 1 BAR o 100 kPa, marca NTK modelo MA0114. Este tiene su conexión al colector de admisión por medio de la boquilla de admisión y referencia el vacío del motor con la presión del ambiente para saber en qué punto de operación está el motor. Este funciona con relación de voltaje/vacío, detallada en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación Voltaje/Vacío del sensor MAP

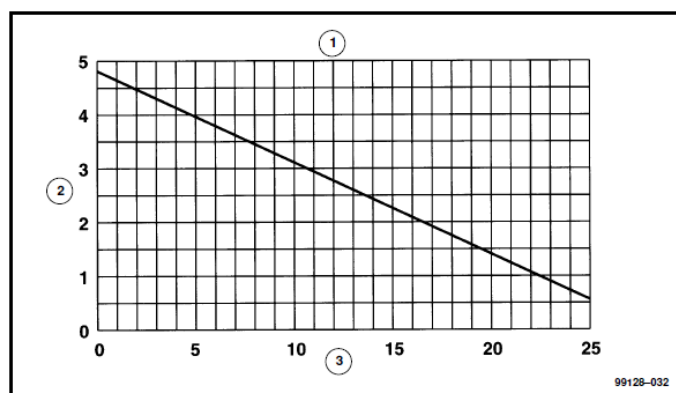


Figure 32 MAP Voltage vs. Vacuum

1	Done at 29.92 Baro at Sea Level	3	Vacuum
2	Voltage		

Nota: Adaptado de *The Viper “Engine Management” Book*.

(<https://wranglerforum.com/attachments/stoichiometric-af-ratio-pdf.128512/>)

Para entiempar el motor se tiene el sensor del cigüeñal y del árbol de levas. Estos están ubicados en la campanola y en el distribuidor integrado respectivamente. Para el sensor del cigüeñal, se tiene marca NTK EH0173 y el del árbol de levas es el original del vehículo, similar al AUTOLINE D6511. Para la posición del pedal se tiene un potenciómetro en la boquilla de la admisión que tiene una referencia voltaje/porcentaje de apertura.

4.2.1.1.6 Otras características generales

El vehículo antes de las modificaciones tenía aproximadamente 185.000 millas o 297.729 kilómetros. Esto cabe destacarlo para tener idea la condición de todas las partes mecánicas.

4.2.1.1.7 Registro de datos

Se utiliza un dispositivo de recolección y modificación de datos por medio del puerto OBDII. Este es marca HPTuners modelo MPVI2. Existe variaciones de canales recolectados dado que, al inicio de recolección de datos, la compañía mantuvo actualizaciones a lo largo de las mediciones.

4.2.1.1.8 Consumo

Estos datos fueron recolectados con base al número tomado a la hora de comprar gasolina en el dispensador y a la opción del odómetro que tiene la posibilidad de borrarse a disposición

4.2.1.1.9 Emisiones

Se tiene registro de las emisiones por parte de la revisión técnica vehicular. Estas de demuestran en la Tabla 2

Tabla 2. Emisiones medidas por Revisión Técnica Vehicular (RTV). Plantel de San Miguel.

Fecha	Odómetro	COR %	HCR p.p.m	CO2R %	LAMBR	COA %	HCA p.p.m	CO2A %	LAMBA
12-12-19	184646	0.1	72	15	1.02	0.2	15	14	1.06
12-12-18	182529	0.1	106	14	1.02	0.3	22	13	1.15
03-12-20	185452	0.1	114	14	1.03	0.1	29	13	1.1
02-12-21	186438	0.2	53	13	1.19	0.2	12	12	1.2

4.2.2 Desarrollo de modificaciones

Las modificaciones se realizarán en tres etapas, donde estas son consecutivas y progresivas. No se pueden realizar sin antes aplicar la anterior.

4.2.2.1 Primera etapa. Cambios en el software de la computadora

En esta etapa, solo se le harán cambios a la computadora del vehículo, usando el dispositivo de modificación HPTuners MPVI2. Para realizar estos cambios, se debe descargar el software respectivo y conectar el dispositivo al puerto OBDII. Luego de la sincronización con el vehículo, se extrae el software original de fábrica, se hace una copia del mismo y se empieza la modificación de esta. En este caso existen 3 versiones con cambios considerables, donde dentro de estas existen varias revisiones con cambios mínimos.

Para la primera versión MOD1 solo se realizó pruebas de funcionamiento a la hora de cambios de parámetros. Estas resultaron exitosas, pero no son de interés para el cumplimiento de los objetivos del trabajo.

Para la segunda versión MOD2, se probaron otros parámetros, como el aumento del tiempo en ralentí después del arranque, se bajó el tiempo para que la computadora entre en laso cerrado (Close loop). Se bajo el límite de la temperatura del motor (ECT) y velocidad del vehículo (VSS) para que entre en modo DFCO con más antelación. Se subió el límite de velocidad del vehículo a 409 KM/H para evitar algún corte de gasolina o ignición en pruebas. Se bajo el límite de corte de combustible de 5300 a 5000 para evitar daños al motor por sobre revoluciones. Finalmente se ajustó una luz de cambio de marcha para mantenerse un tiempo mayor encendida y aun lapso de condición menor. De nuevo, estos cambios fueron exitosas, pero no son de interés para el cumplimiento de los objetivos del trabajo.

Para la tercera versión MOD3 se mantuvieron los cambios de la versión anterior, y se modificaron otros parámetros poco importantes para el cumplimiento de los objetivos.

Finalmente, la cuarta versión MOD4, se realizaron cambios importantes al software. En este caso existieron 7 revisiones, donde se detallará la revisión MOD4.4 y MOD4.5.

En MOD4.4 se mantuvieron los cambios de MOD2, y se adelantó el avance de ignición y se modificaron algunas áreas del tiempo de apertura de los inyectores. En este caso se notó una mejora en la respuesta del acelerador, especialmente en alta carga. Si existieron varios inconvenientes utilizando esta revisión, específicamente en baja RPM, alta carga (Salidas de altos

o cuestras con marchas bajas), donde se puede oír un “cascabeleo”, con un sonido característico similar a un motor Diesel que es causado por detonación dentro del cilindro.

En MOD4.5 se mantuvo la configuración anterior, pero se realizó un cambio para evitar el cascabeleo en bajas RPM y alta carga.

4.2.2.1.1 Sistema de ignición.

En la Imagen 3 se puede notar una “isla” más blanda comparada con la tabla original (Imagen 1). Esto se nota con una transición entre diferentes velocidades del motor más dócil, con un característico empuje crecidamente lineal (Se nota en la comparación de la Imagen 6 e Imagen 7). Existe un incremento en potencia notable sin detonación en los cilindros audible de 1500 RPM en adelante a posición máxima del pedal. Esto significa que se tiene la mayor presión posible dentro de los cilindros con un torque mayor como resultado.

Imagen 3. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD4.4

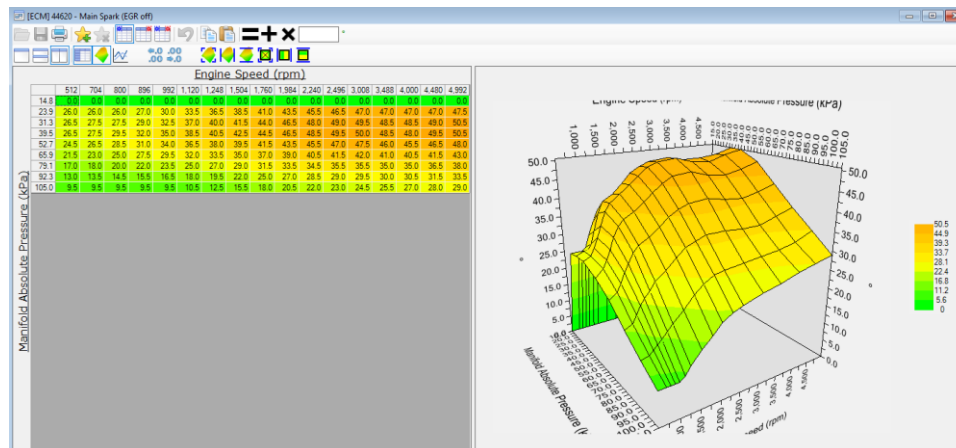
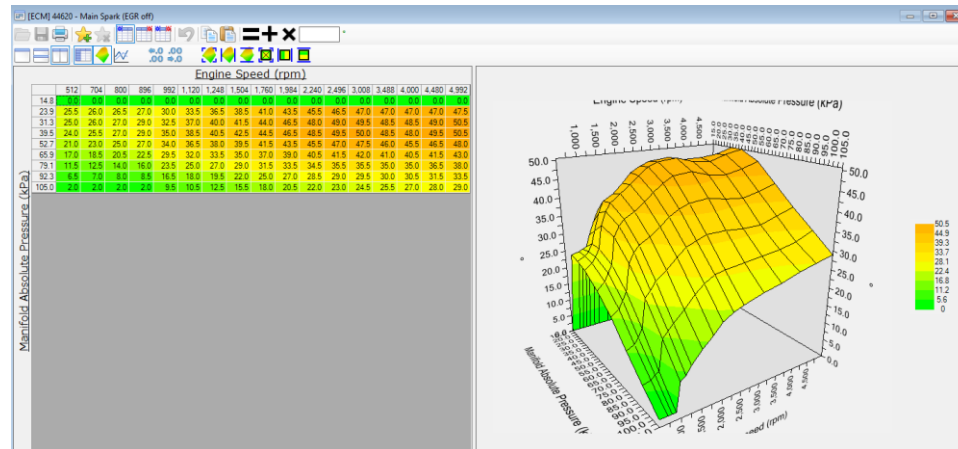


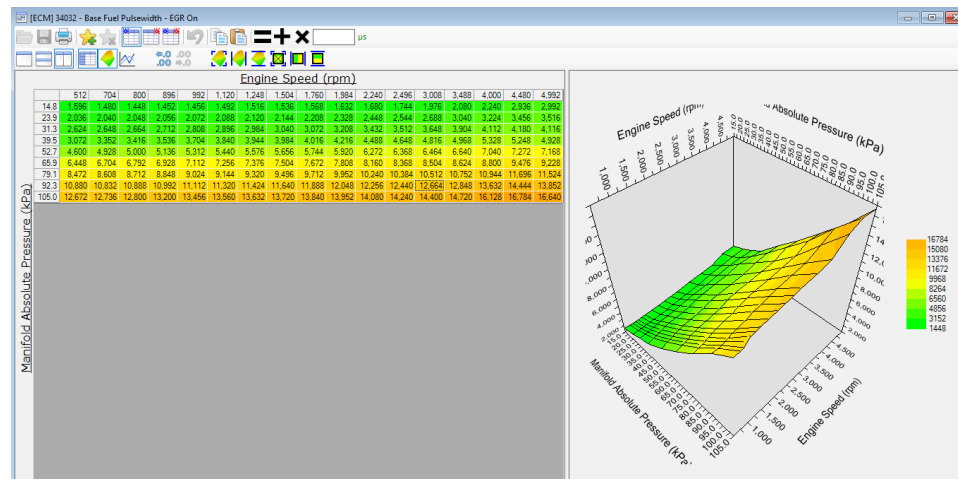
Imagen 4. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD4.5



4.2.2.1.2 Sistema de inyección de combustible

Para este caso solo se cambió ligeramente en algunas áreas de la rampa, no existe un cambio significativo de consumo de combustible (0.87% a 1.47% del ciclo de trabajo) a posición máxima del pedal

Imagen 5. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible MOD4.4



4.2.2.1.3 Comparación de datos

Imagen 6. Registro Original



Imagen 7. Registro con MOD4.4

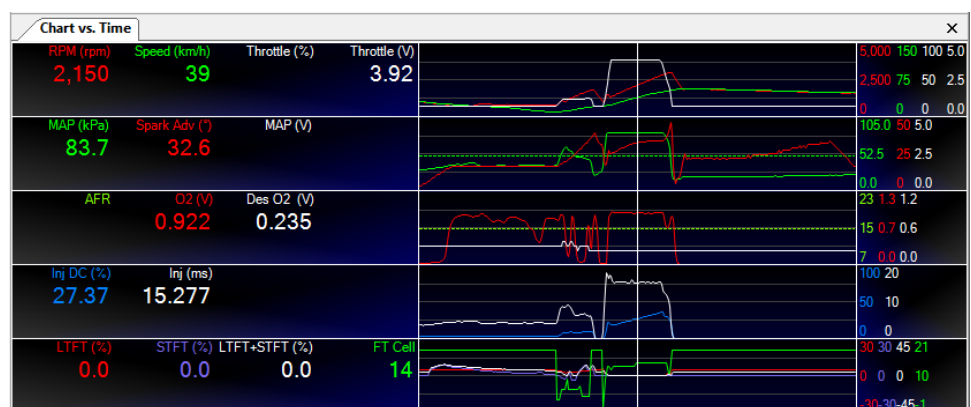
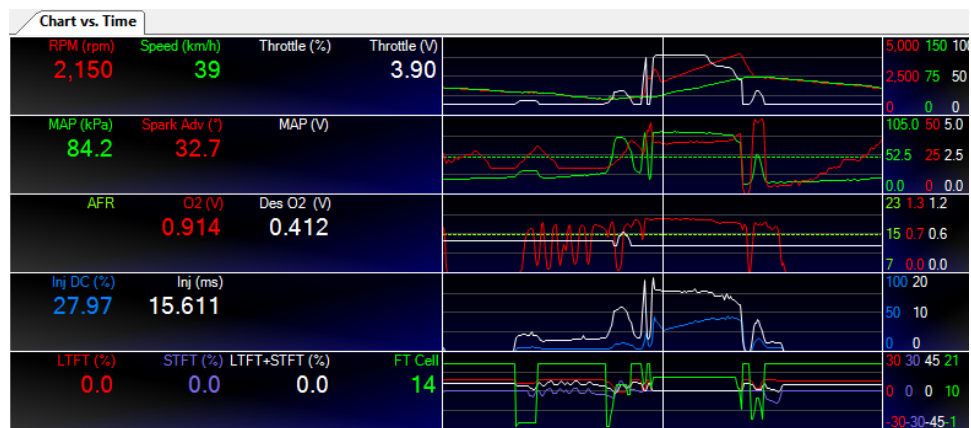


Imagen 8. Registro con MOD4.5



4.2.2.1.4 Consumo.

No existe un cambio significativo al consumo a largo plazo en cargas variadas. Solo se varia un 0.87% a 1.47% del ciclo de trabajo de los inyectores donde podría ser variables no controladas. Además, dado a que no se decidió realizar un estudio a largo plazo por las indicaciones anteriores, no se tiene registro de este.

4.2.2.1.5 Costo.

El único costo para considerar en el cambio de software es el precio del HPTuners MPVI2 y el token, demostrado en la Tabla 3

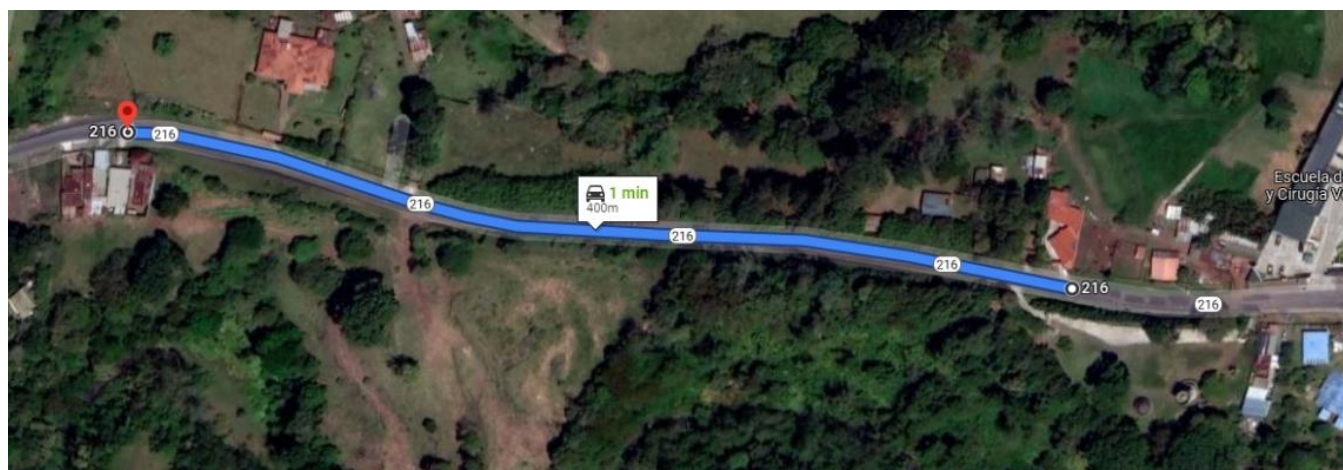
Tabla 3. Partes utilizadas en las tres etapas.

Parte	Marca	Modelo	Cantidad	Costo Unitario (₡)	Costo final (₡)
Dispositivo de modificación y recolección de datos	HPTuners	MPVI2	1	250,917.35	250,917.35
Token para el MPVI2	HPTuners	Universal Token	1	30,782.78	30,782.78
Combo 8 Inyectores Bosch	Bosch	280150558	1	28,540.03	28,540.03
Intercambiador de calor	Sin Marca	KD4043	1	69,701.01	69,701.01
Turbocompresor	MaxSpeedingRods	T3/T4	1	132,743.36	132,743.36
Kit sensor de mezcla de combustible banda ancha	AEM	30-0300	1	126,460.17	126,460.17
Sensor MAP 2 Bares	NTK	MA0181	1	9,259.96	9,259.96
Manga recta silicón 3" (76mm)	Samco	3" (76mm)	2	5,309.73	10,619.46
Manga recta silicón 3.5" (89mm)	Samco	3.5" (89mm)	1	6,194.69	6,194.69
Codo 90 Hierro negro 1-1/2	Sin Marca	90 HN 1-1/2	2	430.00	860.00
Codo 45 Hierro negro 1-1/2	Sin Marca	45 HN 1-1/2	6	265.00	1,590.00
Tee Hierro negro 1-1/2	Sin Marca	T HN 1-1/2	4	985.00	3,940.00
Conector Sensor MAP	WVE	1P1541	1	12,388.50	12,388.50
Total					683,997.31

4.2.2.1.6 Ubicación de las pruebas controladas.

La ubicación de las pruebas es en San Rafael, Vázquez de Coronado, San José. El trayecto tiene una ligera pendiente, con una diferencia de alturas de aproximadamente 36 metros, creando un ángulo aproximado de 5 grados, que equivale a una pendiente de 8.7%. Durante las pruebas se verifica que no existan peligros, ganadería o transeúntes para evitar el factor de riesgo, respetando los límites de velocidad. En este caso se transita de izquierda a derecha para aprovechar la carga que genera subir la pendiente.

Imagen 12. Tomada de Google Maps.



4.2.2.2 Segunda etapa. Cambios de inyectores.

En esta etapa, se explicará los cambios realizados antes, durante y después del remplazo de inyectores, también su selección y otros factores que se tomaron en cuenta. Para esto se detallará los cambios realizados en el software de la computadora y registros realizados durante las pruebas antes y después de su instalación.

Empezando con el sistema original, se tiene una tubería o conducto de acero, con adaptadores donde se ubican seis inyectores, marca Siemens-DEKA, modelo 53030778, tipo EV1. Sus especificaciones son a 3 bares un 243.8 cc/min. Estos están alimentados por la bomba de gasolina que presuriza el sistema a 3.39 Bares. En la Imagen 13 e

Imagen 14 se puede notar el inyector original en la izquierda. Se puede visualizar un solo orificio de salida.

En la escogencia de los inyectores, se debe tomar en cuenta el tipo del inyector, dado que, al existir varios tipos, el único compatible al sistema de inyección original, sin realizar cambios significantes como cambio de tubería o remplazo de los conectores, es el EV1.

Luego, en su momento se tenía previsto la utilización de un sistema de inducción forzada (Tercera etapa), donde el caudal requerido de los inyectores debería ser al menos 50% a 100% mayor comparado con los inyectores originales, esto para asegurarnos que la mezcla a presiones mayores de las atmosféricas como máximo 2 bares, no existiera un problema de falta de combustible, además un factor de seguridad. También se toma en cuenta la bomba de gasolina y su caudal máximo, donde en este caso no es reemplazada dado que si supe con las demandas tanto con el cambio de inyectores y con sistema de inyección forzada. Finalmente, la última consideración de remplazo es la escogencia de un inyector mejor en atomización que el original de un orificio.

Para esto se toma en cuenta y se investiga que cumpla con las características anteriores y se escogió el inyector marca Bosch, modelo 0280150558, tipo EV1, con un caudal de 440 cc/min, de cuatro orificios. El caudal es mayor por un factor de 1.8 aproximadamente. Se tiene el mismo tipo de inyector con el mismo conector y es un remplazo directo en la parte mecánica.

En la parte de software, simplemente se toma el factor de 1.8 a la inversa (aproximadamente 0.55) y se modifican las tablas relacionadas al tiempo de inyección y otros factores de corrección. En este caso solo existieron tres versiones (MOD5.1, MOD5.2 y MOD5.3), donde las dos primeras

fueron pruebas con las tablas corregidas y la última fue cambios en calibración para una mejor manejabilidad. Mas adelante se detallará esta parte.

4.2.2.2.1 Sistema de inyección de combustible

En la Imagen 13 se puede notar que los inyectores originales comparado con los nuevos son idénticos, donde las diferencias son en la punta de inyección con los cuatro orificios (Imagen 14), y otros cambios que no afectan su instalación (Imagen 15 e Imagen 16).

Imagen 13 . Comparación lateral entre inyector original (izquierdo) e inyector nuevo (derecho)



Imagen 14. Comparación inferior entre inyector original (izquierdo) e inyector nuevo (derecho)



Imagen 15. Inyectores originales instalados



Imagen 16. Inyectores nuevos instalados



Imagen 17. Comparación de la aspersion entre un inyector de 4 orificios (4 izquierdos) y de un orificio (los 4 siguientes a la derecha)



Nota. Captura tomada en el minuto 1:02 del video
[https://www.youtube.com/watch?v=bHf-6ohkgbA&t=1s.](https://www.youtube.com/watch?v=bHf-6ohkgbA&t=1s)

Para la parte de software, solo se tomará en cuenta MOD5.3 dado que fue el remplazo de MOD4.5, manteniendo la parte de ignición, solo modificando las tablas relacionadas a la inyección de combustible. Estas tablas son:

- Injector Min Pulsewidth: Es el tiempo mínimo de inyección. Esta se cambia dado que existe una correlación del tamaño del inyector y su tiempo de apertura, dado que solo se va a activar un 55% menos que el inyector original por ser casi el doble del tamaño.
- Minimum Pulse For Closed Loop: De igual manera con el punto anterior, solo que es el tiempo mínimo de apertura para lazo cerrado
- Battery Voltage Correction: Este factor de corrección se debe cambiar dado que las características de los inyectores nuevos son diferentes a los originales
- Prime Shot Pulsewidth: Este factor de purga debe ser 55% menos que el inyector original por ser casi el doble del tamaño. En caso contrario, el motor quedaría con exceso de gasolina a la hora de arranque
- Crank Injection PW: Este factor es sobre el ancho pulso (o tiempo de apertura) de inyección. Este factor debe ser 55% menos que el inyector original por ser casi el doble del tamaño.
- Base Fuel Pulsewidth - EGR Off: Esta es la tabla principal de inyección de combustible. A *grosso modo* se disminuye un 55% para el arranque inicial y luego se calibra específicamente en diferentes áreas para una mejor conducción.
- Warmup Enrich (Time-based). Esta tabla es un factor de suma al tiempo de inyección que su fin es calentar el motor rápidamente hasta su punto de operación indicado (después de 160 segundos) Este factor debe ser 55% menos que el inyector original por ser casi el doble del tamaño. Está basado al tiempo de operación y a la temperatura del refrigerante del motor
- Warmup Enrich (MAP-based) Esta tabla es un factor de suma al tiempo de inyección que su fin es calentar el motor rápidamente hasta su punto de operación indicado (después de 198.5 grados Fahrenheit) Este factor debe ser 55% menos que el inyector original por ser casi el doble del tamaño. Está basado en la presión al colector y a la temperatura del refrigerante del motor

Imagen 18 Tablas modificadas. MOD5.3 de sistema de combustible

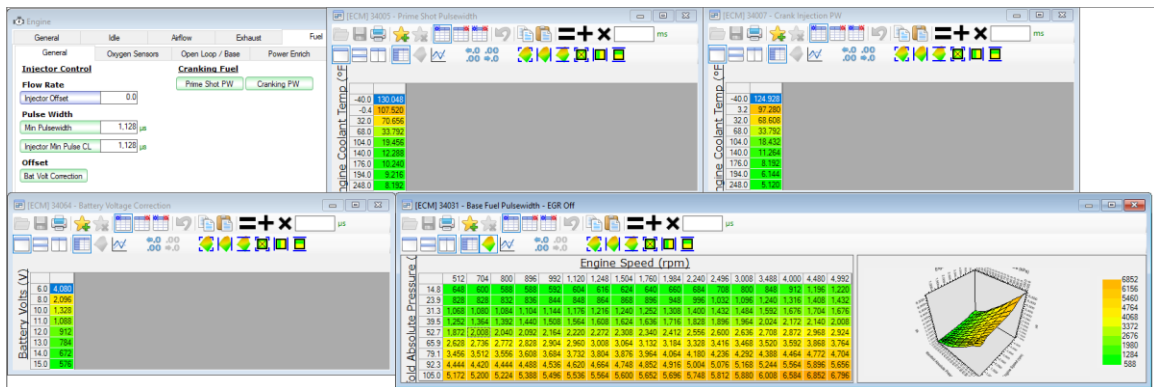


Imagen 19. Tablas originales de sistema de combustible

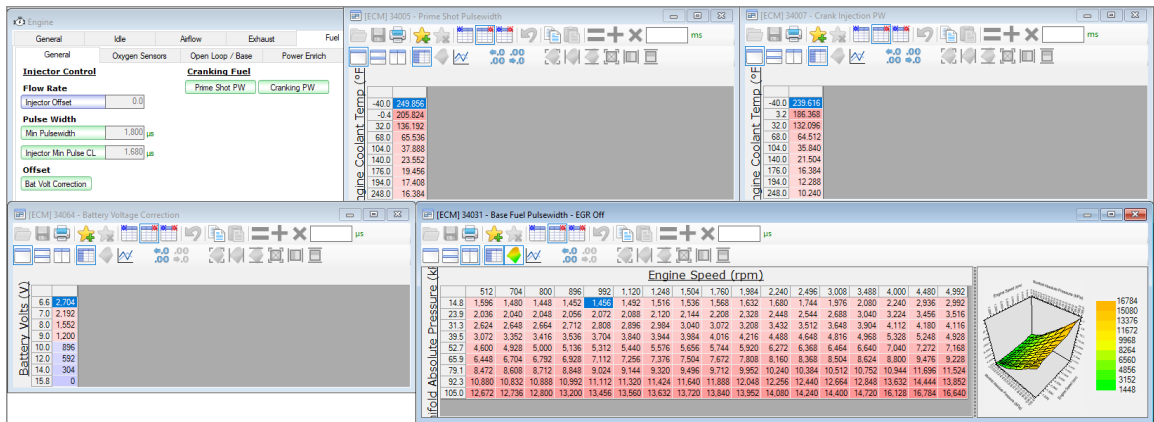
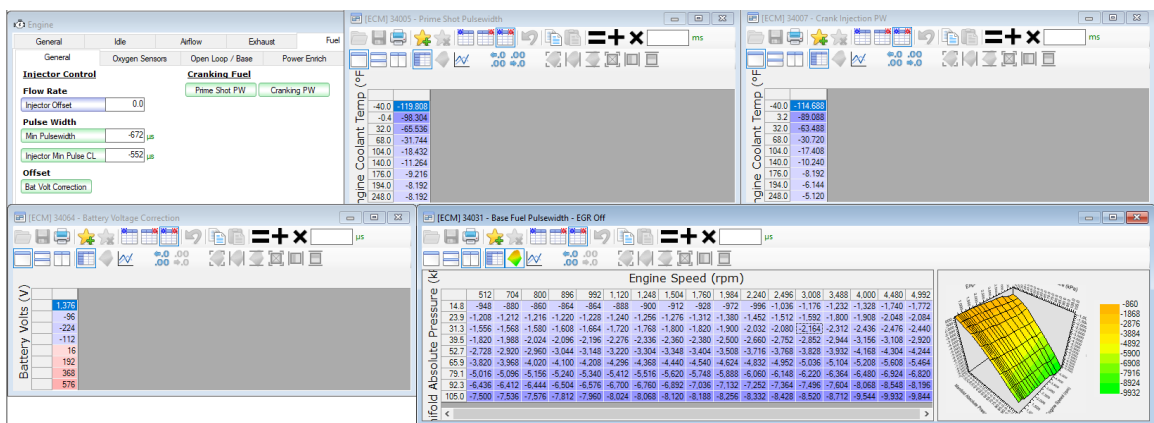


Imagen 20. Comparación de Tablas modificadas entre MOD5.3 y tablas originales de sistema de combustible



4.2.2.2.2 Comparación de datos

El principal cambio en la manejabilidad fue un ralentí más estable, esto puede ser relacionado a dos factores principales:

1. Inyectores limpios y nuevos: Para los inyectores originales se desconoce cuando fueron limpiados por última vez y al menos desde la compra del vehículo por parte del propietario (Febrero 2016), nunca fueron limpiados. De igual manera durante su uso nunca se notó problemas de inyección.
2. Una atomización más fina: Esto trae como consecuencia una quema de combustible más controlada.

De igual manera, cualquiera de las dos opciones anteriores son puntos para considerar para la lectura de los siguientes datos.

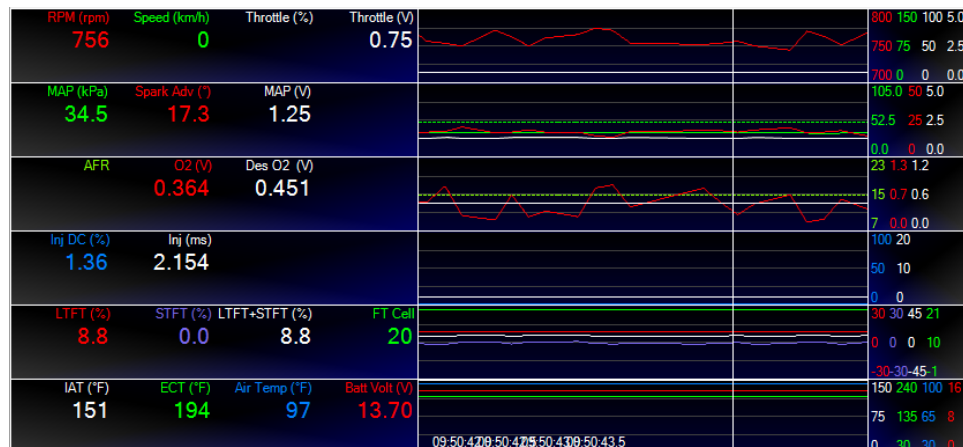
Para el registro original, se puede notar un ralentí relativamente inestable, con el sensor de O2 registrando voltajes bajos, que significa correcciones para mantener la mezcla más rica. Para el tiempo de trabajo de los inyectores, en el registro original se puede ver un 2.34% que equivale a 3.716 milisegundos.

Imagen 21. Registro con Original en ralentí.



Mientras que el registro MOD5.3 se ve un ralentí más estable, con correcciones más considerables, pero más firme. Para el ciclo de trabajo, se ubica en 1.36% que equivale a 2.154 milisegundos.

Imagen 22. Registro con MOD5.3 en ralentí.



4.2.2.2.3 Consumo

Dado al corto tiempo desde el inicio de la instalación de los inyectores a la implementación de la tercera etapa (Sistema de inducción forzada), no se obtuvieron consumos registrables para la buena obtención de datos.

4.2.2.2.4 Emisiones

El Cambio de inyectores y configuración del software se realizó antes del 3 de diciembre del 2020. En emisiones de puede notar un ligero incremento en hidrocarburos tanto acelerado como en ralentí, que está relacionado al lambda o relación de mezcla de combustible, después del cambio de inyectores. Cabe destacar que también existe unas emisiones similares el 12 de diciembre del 2018. De igual manera, antes y después del cambio no afecta de gran medida las emisiones dado a la correcta configuración de la computadora y se mantiene en el rango legal, requerido para la aprobación de la revisión técnica vehicular. Además, existe una incertidumbre sobre la calidad y calibración de los equipos utilizados por la revisión técnica vehicular, aunque todas las pruebas sean en el plantel de San Miguel. También hay que recordar que estos cambios se realizaron en conjunto al cambio del tiempo de ignición.

Tabla 4. Comparación de emisiones tomadas durante las pruebas de revisión técnica vehicular.

Fecha	Odómetro	COR %	HCR p.p.m	CO2R %	LAMBR	COA %	HCA p.p.m	CO2A %	LAMBA	Estado
12-12-19	184646	0.1	72	15	1.02	0.2	15	14	1.06	Original
12-12-18	182529	0.1	106	14	1.02	0.3	22	13	1.15	Original
03-12-20	185452	0.1	114	14	1.03	0.1	29	13	1.1	Etapas 1 y 2

4.2.2.2.5 Costo

El costo de los inyectores al momento de la compra (Noviembre 2 de 2020) fue de \$28,540.03 (Tabla 3). La instalación no tuvo costo por tener las herramientas disponibles y dado que se tiene la herramienta del cambio de software desde la primera etapa, tampoco hay costo por agregar.

4.2.2.3 Tercera etapa. Inducción forzada.

La tercera y última etapa de modificaciones es la recolección de modificaciones anteriores y la implementación de inducción forzada. El tipo de inducción forzada será por medio de un turbocompresor, dado que este tiene la mayor eficiencia de compresión e inducción de aire, dado que colecta gases de escape para comprimir aire atmosférico al sistema de admisión, comparado con el supercargador que es necesaria la implementación de otra polea y faja de transmisión que requiere potencia del motor para comprimir el aire. Este sistema de turbocompresor tiene como gran ventaja de ser más dócil a la implementación, dado que solo requiere de cambios en tuberías y requiere un espacio menor.

4.2.2.3.1 Diseño y cálculos.

Se toma como lineamientos un manual de implementación de Honeywell/Garrett. Esta compañía es reconocida a nivel mundial por sus productos de inducción forzada, como turbocompresores. El manual de implementación es de tres tomos, conocidos como “Turbo-tech” y en nuestro caso se toma con atención la edición 103. Otra fuente valiosa de información es “El manual de turbocargadores” que nos ayuda también en la parte de cálculo.

Iniciando con el cálculo teórico para la escogencia, se debe tener los datos del motor sin turbocompresor. Para esto se tiene un motor de 4 litros 6 cilindros, con un límite máximo de

revoluciones de 5000 RPM, un ralenti de 800 a 700 RPM. Con esto se calcula del flujo o consumo de aire del motor. Para esto se utiliza la siguiente formula:

Ecuación 1. Cálculo del flujo del aire al motor

$$W_a = HP * A/F * BSFC / 60$$

Tomado de (GARRETT MOTION INC, 2017)

Donde:

- W_a : Flujo de aire en Lb/min
- HP: Caballos de fuerza en Hp
- A/F: “Air fuel ratio” Relación de aire combustible
- BSFC: “Brake specific fuel consumption” o Consumo específico de combustible al freno en lb/Hp*hr

Tabulando con 190 caballos de fuerza según fabrica, a una relación de mezcla de aire y combustible de 11.5 y un BSFC de 0.55 lb/Hp*hr, se tiene un consumo de aire de aproximadamente 20 Lb/min. Con base a esto se puede calcular con objetivo los caballos de fuerza finales, el consumo de aire requerido. Esto es de suma importancia para la escogencia del turbocompresor. Por ejemplo, si se quiere aumentar el rendimiento de dicho motor un 50% extra, o subir los caballos de fuerza a 285Hp, se requiere 30 Lb/min, con una relación de mezcla de aire y combustible de 11.5 y un BSFC de 0.55 lb/Hp*hr. Este es un requerimiento para la utilización de los mapas de eficiencia que normalmente da el fabricante de los turbocompresores.

Dado que, al aumentar el flujo, este se restringe por el sistema de admisión, se presuriza dicho sistema. El cálculo para esta singular característica es con base a la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Cálculo de la presión en el colector de admisión en el motor.

$$MAP_{req} = \frac{W_a * R * (460 + T_m)}{VE * N/2 * V_d}$$

Tomado de (GARRETT MOTION INC, 2017)

Donde:

- MAP_{req} : Presión absoluta requerida en el colector con base al caudal (PSIA)
- W_a : Caudal requerido (Lb/min)
- R: Constante de gases 639.6

- Tm: Temperatura de admisión. En grados Fahrenheit
- VE: Eficiencia Volumétrica
- N: Revoluciones por minuto del motor. (RPM)
- Vd: Tamaño del motor. En pulgadas cubicas (CI)

Usando el ejemplo anterior de un rendimiento 50% mayor al original, con un caudal de 30Lb/min, Una temperatura de admisión de 30 grados Celsius, equivalente a 86 grados Fahrenheit, una eficiencia volumétrica de 90%, con el motor girando a 5000RPM y 4 litros equivalente a 224 pulgadas cubicas, esto equivale aproximadamente 19 PSIA.

Dada a la existencia de tuberías, codos y otros elementos que restringen el paso como el intercambiador de calor o “intercooler”, se puede estimar una pérdida de presión máxima de 1 PSI. Esto se debe considerar a la salida del compresor del turbocompresor para mantener el caudal requerido. Tambien en la entrada del compresor del turbocompresor, existen varias restricciones como el filtro de aire, la tubería y codos que restringen ligeramente, pero de igual manera se debe considerar, se estima una pérdida de 1 PSI. Para ambos casos se debe calcular cual va a ser la presión a la entrada y salida del compresor para poder dimensionar correctamente el turbocompresor. Para esto se utilizan las siguientes formulas:

Ecuación 3. Cálculo de la presión en la salida del compresor.

$$P_{2c} = MAP + \Delta P_{loss}$$

Tomado de (GARRETT MOTION INC, 2017)

Donde:

- P_{2c}: Presión absoluta de salida del compresor. (PSIA)
- MAP: Presión absoluta requerida en el colector con base al caudal (PSIA)
- ΔP_{loss}: Perdidas de presión (PSI)

Con base al ejemplo anterior se tiene una Presión de salida del compresor P_{2c} de 20 PSIA

Ecuación 4. Cálculo de la presión en la entrada del compresor.

$$P_{1c} = P_{amb} - \Delta P_{loss}$$

Tomado de (GARRETT MOTION INC, 2017)

Donde:

- P_{1C} : Presión de entrada del compresor. (PSIa)
- P_{amb} : Presión ambiental. (PSIa)
- ΔP_{loss} : Perdidas de presión (PSI)

Con base al ejemplo anterior se tiene una Presión absoluta de entrada del compresor P_{1C} de 13 PSIa, suponiendo una presión ambiente de 14 PSI.

Con estos datos, ya es posible calcular la relación de presión del compresor del turbocompresor. Este es un requerimiento para la utilización de los mapas de eficiencia que normalmente da el fabricante de los turbocompresores. Para esto, se toma la siguiente formula.

Ecuación 5. Cálculo de la relación de presión entre entrada y salida del compresor

$$\Pi_C = \frac{P_{2c}}{P_{1c}}$$

Tomado de (GARRETT MOTION INC, 2017)

Donde:

- P_{1C} : Presión absoluta de entrada del compresor. (PSIa)
- P_{2C} : Presión absoluta de salida del compresor. (PSIa)

Con base al ejemplo anterior se tiene una relación de presión Π_C de aproximadamente 1.54.

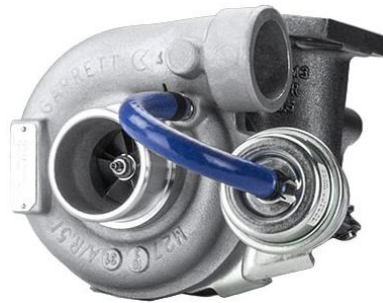
En resumen, se tiene:

- Un 50% extra sobre los 190HP del motor original: 285HP
- Un caudal requerido de 30Lb/min
- Relación de mezcla de aire y combustible de 11.5
- BSFC de 0.55 lb/Hp*hr
- Presión absoluta requerida en el colector con base al caudal de 19 PSIa
- Perdidas en la entrada y salida del compresor de 1 PSI cada una.
- Presión atmosférica a 14 PSI
- Relación de presión de 1.54.

Lo siguiente es tomar el caudal requerido y la relación de presión y verificar que tamaño de turbocompresor podría funcionar con estos requerimientos máximos.

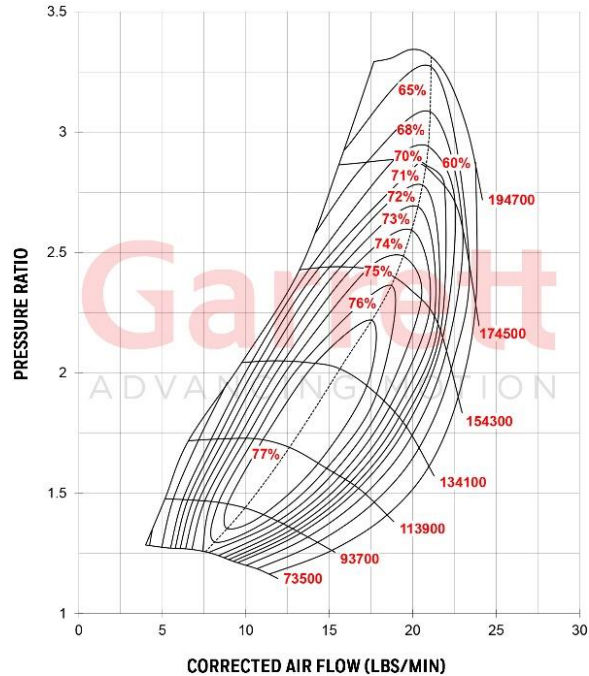
Como primer ejemplo se toma un turbocompresor GT2052 marca Garrett y se revisa la tabla del fabricante. Con esta guía se puede verificar los puntos de operación máximos para saber si el turbocompresor cumple con los requerimientos principales de 30Lb/min a una relación de presión de 1.54

Imagen 23. Turbocompresor Garrett GT2052



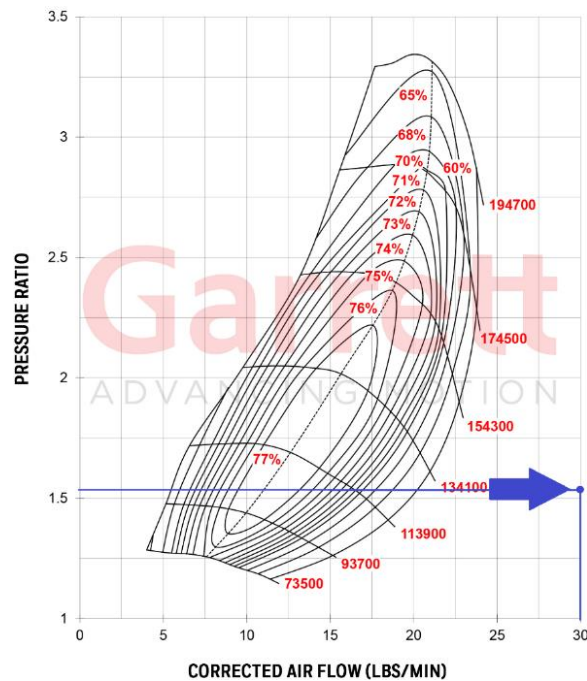
Tomado de <https://www.garrettmotion.com/racing-and-performance/performance-catalog/turbo/gt2052/>

Imagen 24. Mapa del Turbocompresor Garrett GT2052



Tomado de <https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2018/05/Comp-Map-GT-2052R.jpg>

Imagen 25. Mapa del Turbocompresor Garrett GT2052 mostrando el punto de operación máxima con el ejemplo.



Tomado y modificado de <https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2018/05/Comp-Map-GT-2052R.jpg>

Como se puede observar, el punto de operación con este turbocompresor está totalmente fuera del área de la “isla” de eficiencia del compresor, esto significa que es “muy pequeño” y hace que se caliente el caudal del aire al salir del compresor excesivamente.

Finalmente, otro punto a considerar es la operación del motor a otro rango de revoluciones por minuto. Para esto se toma la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Cálculo de la presión en el colector de admisión en el motor.

$$W_a = \frac{MAP * VE * \frac{N}{2} * V_d}{R * (460 + T_m)}$$

Tomado de (GARRETT MOTION INC, 2017)

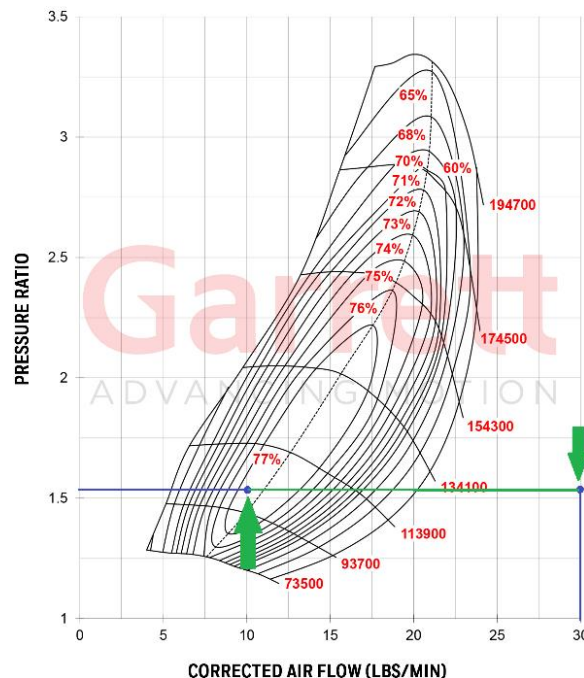
Donde:

- MAP_{req} : Presión absoluta requerida en el colector con base al caudal (PSIa)

- W_a : Caudal requerido (Lb/min)
- R : Constante de gases 639.6
- T_m : Temperatura de admisión. En grados Fahrenheit
- VE : Eficiencia Volumétrica
- N : Revoluciones por minuto del motor. (RPM)
- V_d : Tamaño del motor. En pulgadas cubicas (CI)

Usando como ejemplo un rango de operación de 1500 RPM a 5000RPM, manteniendo las variables anteriores constantes como relación de presión, relación de aire combustible, y demás, se puede observar en la línea verde como se comportaría el motor con este turbocompresor como ejemplo. Hay que notar que a partir de las 20 Lb/min, el turbocompresor sale de su rango de operación eficiente. Esto es aproximadamente a las 2900 RPM, donde ni siquiera se ha alcanzado el máximo torque según fabrica. La única ventaja de este turbocompresor en específico es su rapidez de alcanzar la presión necesaria a bajas RPM

Imagen 26. Mapa del Turbocompresor Garrett GT2052 mostrando el punto de operación media con el ejemplo.



Tomado y modificado de <https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2018/05/Comp-Map-GT-2052R.jpg>

En la escogencia final del turbocompresor, se tiene varias opciones dependiendo de las características de operación. Para esto se debe considerar el rango de operación del motor, uso diario normal y que área de la curva característica de potencia se desea modificar. También dada a la gran cantidad de tipos de turbocompresores, como el T25, T3, T4, híbridos entre T3 y T4, modelos específicos y demás, se hará escogencia con base a las fórmulas anteriores de consumo de aire del motor, potencia esperada y demás cálculos teóricos hechos en una hoja de cálculo.

Para mantener una manejabilidad correcta también hay que tomar en cuenta la operación desde presión atmosférica a nivel del mar hasta la máxima altura que sea transitable en vehículo, como por ejemplo el volcán Irazú. Esto afecta la relación de presión de la Ecuación 5 por incluir parte de la Ecuación 4. Esto es de suma importancia dado que es muy posible que durante un trayecto subiendo o bajando con respecto al nivel del mar, la presión atmosférica cambie drásticamente y por consiguiente el turbocompresor opere en regiones fuera de la isla de eficiencia.

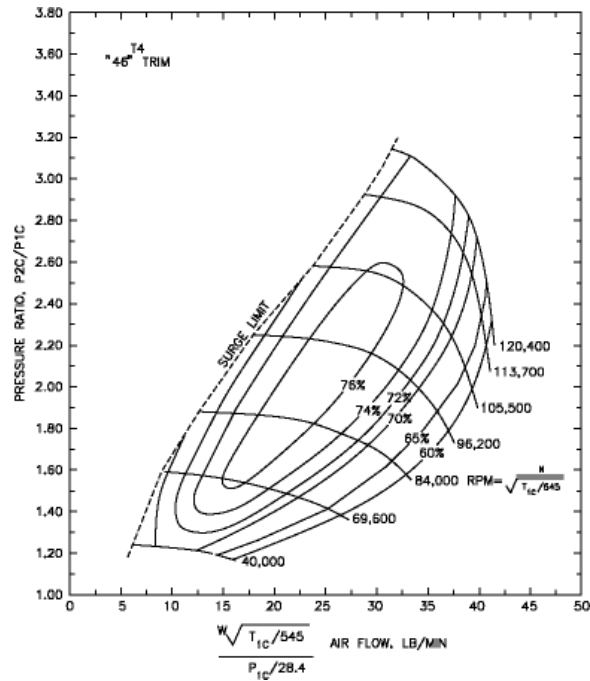
Luego, se desea una operación segura del motor, sin afectar la confiabilidad de este, para esto se tiene un límite en la válvula de alivio de escape a 10 PSIG, para así evitar problemas de detonación a altas presiones, o un desbocamiento del turbocompresor en altas cargas. Sabiendo este límite de 10 PSIG, se puede estimar las potencias a diferentes alturas.

Sabiendo los puntos anteriores, se sabe lo siguiente:

- Operación a nivel del mar con presión atmosférica máxima de 15 PSIA
- Operación a 3500 metros sobre el nivel del mar, con presión atmosférica mínima de aproximadamente 10 PSIA.
- Potencia variable según la altura
- Límite de presión a 10 PSIG

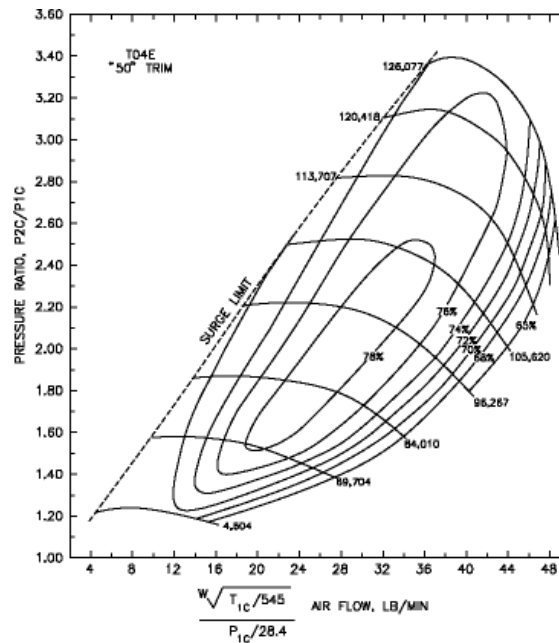
Con esto, la relación de presiones es aproximadamente de 1.81 a nivel del mar y 2.22 a 3500 metros sobre el nivel del mar. Los caudales de consumo de aire varían por mantener la presión y a su vez cambia la potencia estimada. Con esto se encontró un tipo de turbocompresor que opera en estas regiones de presión. El modelo es el T04E, pero existen varias relaciones del impulsor o “trim”. En el mercado costarricense se escogió un turbocompresor T04E de trim 48. Dado que el turbocompresor no es de una marca reconocida, se va a estimar su rango de operación con base a dos gráficos de trim 46 y 50.

Imagen 27. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 46



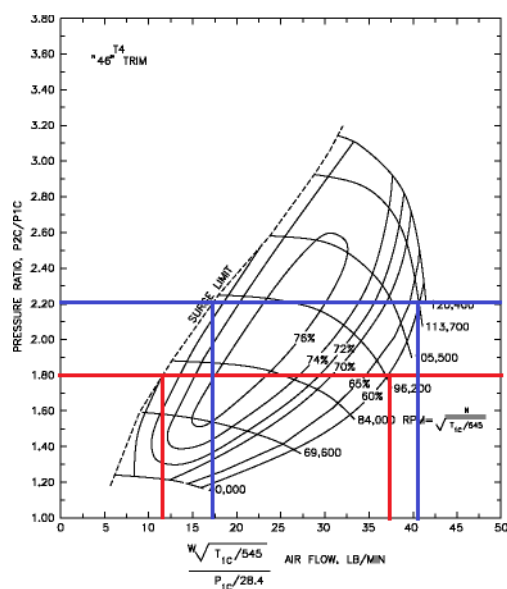
Tomado de <https://www.micturbo.com/t04e-flow-maps>

Imagen 28. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 50



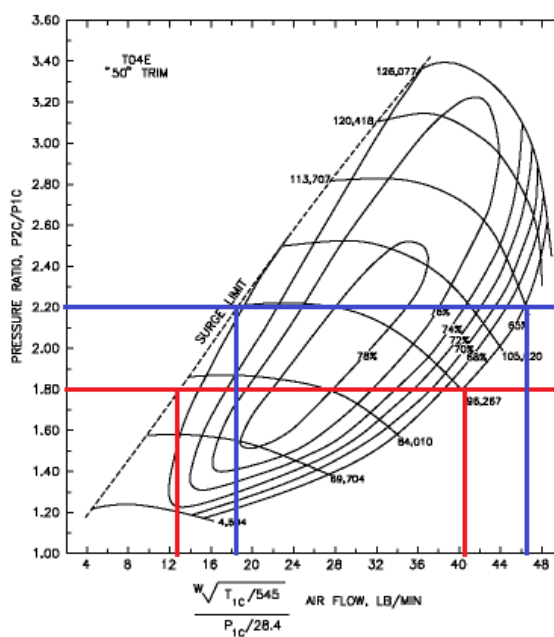
Tomado de <https://www.micturbo.com/t04e-flow-maps>

Imagen 29. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 46 con el rango de operación máximo



Tomado de <https://www.micturbo.com/t04e-flow-maps>

Imagen 30. Isla de eficiencia del turbocompresor de trim 50 con el rango de operación máximo



Tomado de <https://www.micturbo.com/t04e-flow-maps>

Como se puede observar, ambos gráficos tienen un gran margen de operación en baja y alta presión atmosférica. Las líneas azules indican en baja presión atmosférica (gran altitud) y la línea roja indica alta presión atmosférica (baja altitud). Con base a esto se puede estimar lo siguiente.

Tabla 5. Comparación de presiones, altitudes y potencias.

Turbocompresor a 10 PSIG, Motor a 5000RPM, A/F 11.5, BSFC 11.5				
Altitud M.S.N.M	Presión atmosférica PSIA	Relación de presión	Consumo de aire Lb/min	Potencia equivalente Hp
0	14.7	1.79	36.9	350
1200	12.8	1.93	34.3	325
3500	9.92	2.25	30	285

Comparando la Tabla 5 con la Imagen 29 e Imagen 30, se puede observar que, en el peor de los casos, el consumo máximo de aire teórico es de 36.9 Lb/min a nivel del mar, estando en el límite de eficiencia para el turbocompresor de trim 46, pero dentro del rango del compresor trim 50. Estimando esto, se puede inferir que está dentro del rango de operación para el turbocompresor de trim 48.

Para el cálculo en “bajas revoluciones”, con base a la hoja de cálculo, se aprecia que, a menor altitud, mejor respuesta a bajas revoluciones o “más rápido y antes” actúa el turbocompresor.

Tabla 6. Comparación de presiones, altitudes y potencias. Turbocompresor trim 46

Turbocompresor trim 46 a 10 PSIG, Motor a 5000RPM, A/F 11.5, BSFC 11.5, VE 70%			
Altitud M.S.N.M	Presión atmosférica	RPM mínimo	Consumo de aire
0	14.7	1800	11
3500	9.92	3500	17

Tabla 7. Comparación de presiones, altitudes y potencias. Turbocompresor trim 50

Turbocompresor trim 50 a 10 PSIG, Motor a 5000RPM, A/F 11.5, BSFC 11.5, VE 70%			
Altitud M.S.N.M	Presión atmosférica	RPM mínimo	Consumo de aire
0	14.7	2100	13
3500	9.92	3700	18.5

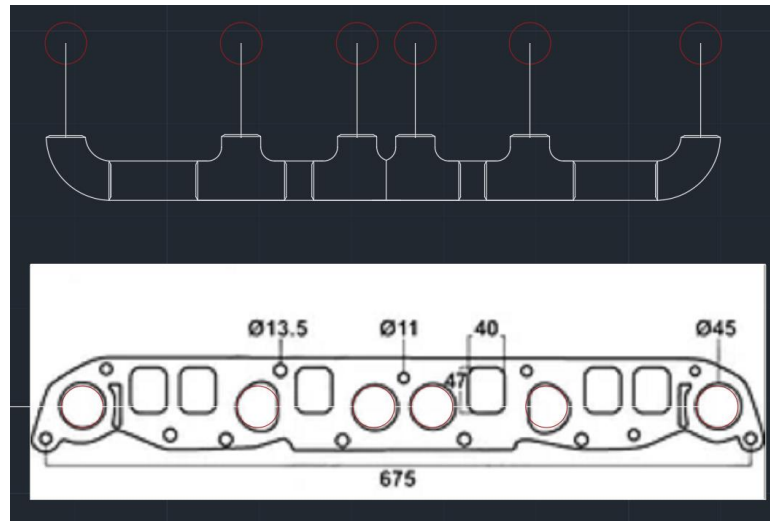
Esto demuestra que, en el peor de los casos, el turbocompresor con más retraso o “lag” es el de trim 50, especialmente en altitud considerable. De igual manera hay que recordar que no es inmediata la subida de presión y que progresivamente sube al punto máximo de 10 PSIG, esto significa un aumento gradual de potencia a lo largo de las RPMs.

Después de la escogencia del turbocompresor, se debe definir la ubicación del turbocompresor. Para esto se considera varias opciones como después del colector de escape original, como lo indica la Imagen 31, pero con el inconveniente de que el colector presenta rajaduras por fatiga. Para esto se decide la construcción de uno nuevo con base al colector original. Se inicia el diseño con tubería cedula 40 de acero al carbono de 1-1/2 pulgadas o 38.1 milímetros de diámetro interno, similar a los tubos del colector original de 1” y se diseña en AutoCAD (Imagen 32)

Imagen 31. Posibilidad de posición del turbocompresor.



Imagen 32. Esquema en general del diseño del colector.



4.2.2.3.2 Implementación

Al tener todos los materiales, se procede al ensamblaje del colector, manteniendo el turbocompresor debajo del colector de admision para un enssamblaje compacto. Durante la construccion del manifiild de escape, este se ensambla de manera similar al esquema utilizado en la Imagen 32. Su ensablaje se puede ver en la .

Imagen 33.

Imagen 33. Inicio de la construcción del colector de escape



Aquí se nota la utilización de codos de 45 grados para tener un espacio entre el block y una rotación del turbocompresor, creando un espacio para su instalación de manera menos laboriosa. Luego en la .

Imagen 34 se puede notar su alineamiento en cada uno de los codos.

Imagen 34. Alineamiento de los codos de 45 grados del colector de escape.



Imagen 35. Resultado final del colector de escape con el turbocompresor instalado.



Luego de la instalación del colector con el turbocompresor, se procede a realizar el bajante del tubo de escape. Para esto se debe conservar el catalizador para cumplir con los requerimientos de emisiones. También así mantenido los sensores originales de mezcla de combustible, conocidos como de oxígeno, para un correcto funcionamiento por parte de la computadora del motor. Para esto se requiere un codo de fabricación especial por medio de cortes estilo “pastel” cada uno formando un ángulo de 7.5 grados (mostrado en la Imagen 36).

Imagen 36. Bajante del tubo de escape después del turbocompresor.



Luego de la soldadura de sus partes y la instalación de las roscas donde van ubicados los sensores de oxígeno, se procede a cubrir el tubo con un aislante de fibra de vidrio (

Imagen 37), para evitar el calor excesivo del escape a la cabina, también para proteger otros componentes cercanos a este, como líneas de freno, tubería del Clutch y cableado aledaño.

Imagen 37. Tubería de escape con aislante.



Luego del bajante del turbocompresor, se procede a la instalación de la tubería continua por medio de un adaptador hacia la tubería que va conectada al catalizador y finalmente al silenciador. Para esto se reutiliza la tubería existente y se modifica parte del recorrido, pasando por debajo de la cabina y teniendo la salida del escape al costado del vehículo al frente de la llanta trasera del lado del conductor. En este caso no se utiliza aislante de fibra de vidrio dada a la instalación de una barrera metálica al piso de la cabina, para evitar el calor.

Imagen 38. Final del bajante previo a la instalación del adaptador

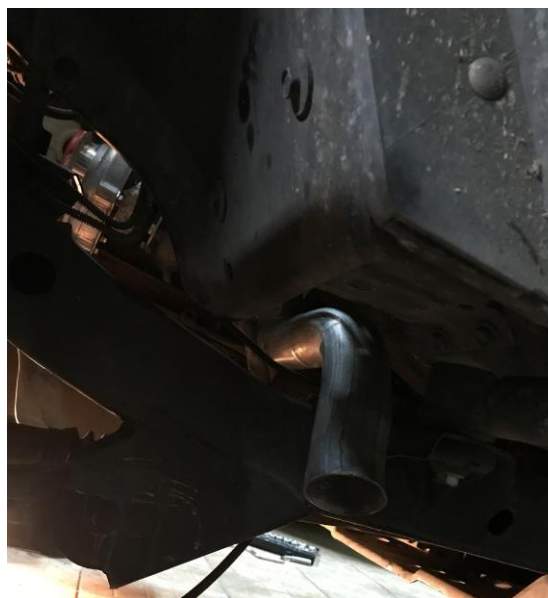


Imagen 39. Instalación del catalizador con el adaptador

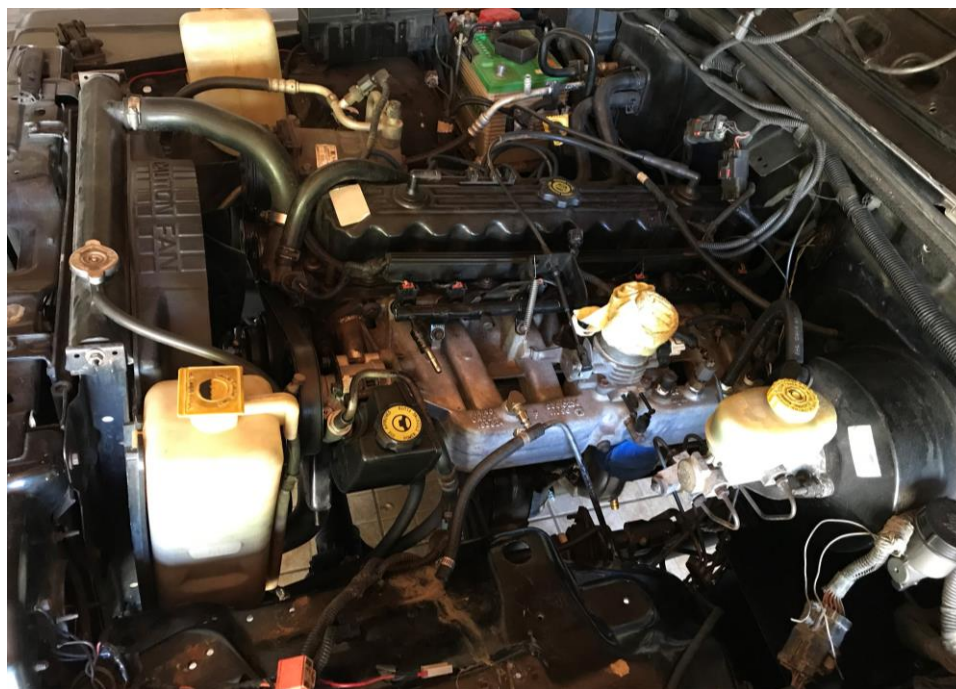


Imagen 40. Conjunto final del catalizador con el silenciador.



Luego de la instalación del sistema de escape, se procede al sistema de admisión. Para esto, se debe considerar la instalación de un intercambiador de calor (conocido popularmente como “Intercooler”) de aire/agua. Para esto se debe ubicar en un lugar accesible para la tubería entrante y se realiza el cambio de ubicación del depósito de agua jabonosa para la limpieza del parabrisas (Imagen 41). Luego se procede a instalar la tubería en la salida del compresor y se conecta al intercambiador de calor, donde el aire pasa a través de él y luego pasa a la boquilla de admisión en el colector de admisión. Para esto, en todas sus uniones se instalan acoples de silicón por la flexión del motor con respecto a la carrocería y así evitar rupturas de tubería en caso de ser solidas.

Imagen 41. Cambio de posición del tanque de agua jabonosa y preparación del espacio para el intercambiador de calor



La entrada del compresor del turbocompresor también se procede a la construcción e instalación a medida de un depurador con su filtro para evitar la inclusión de partículas dañinas tanto al turbocompresor como al motor y demás sistemas de admisión. Para esto se emplea una caja metálica del tamaño suficiente para que quepa el filtro de aire (Imagen 43). Luego se une con tubería metálica y finalmente se concluye con acoples de silicón entre finales de tuberías.

Imagen 42. Construcción del depurador a medida



Imagen 43. instalación del depurador con el filtro de aire.

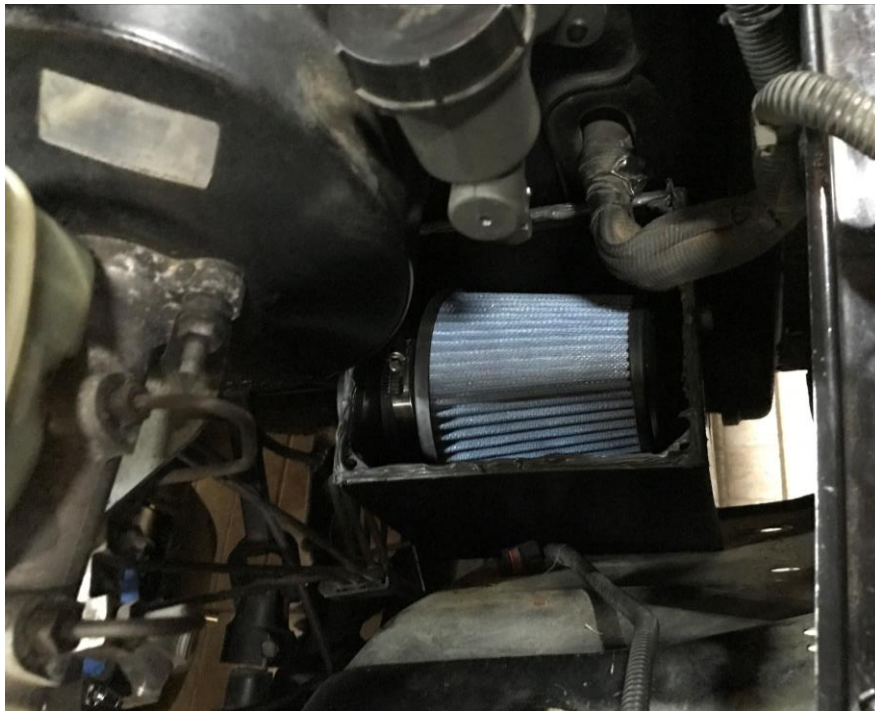
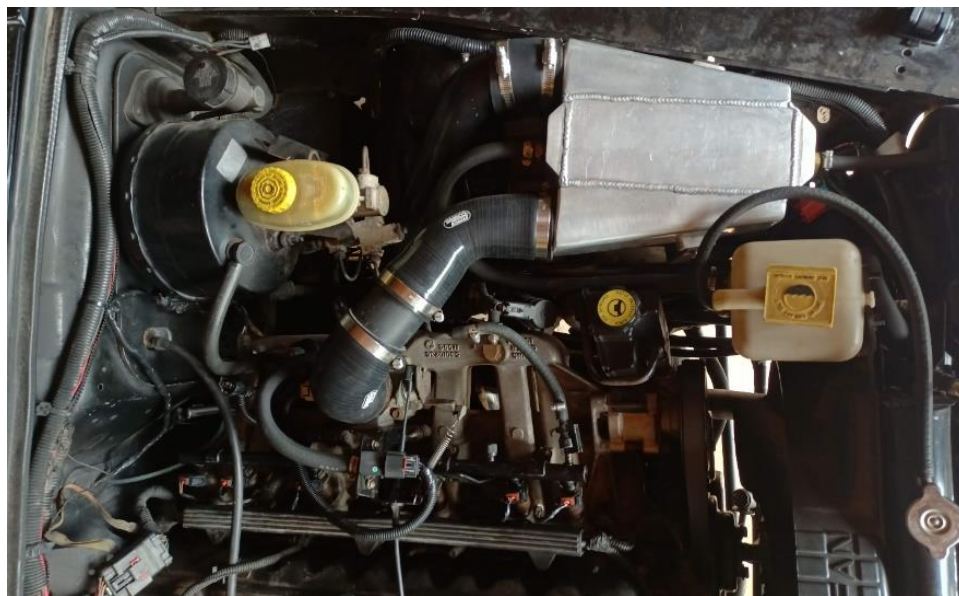


Imagen 44. Sistema de admisión instalado.



4.2.2.3.3 Sensores

Para el control de la mezcla de combustible correcta, se instala un sensor de banda ancha o “wideband” independiente del sistema de control de combustible de la computadora original del motor. Esto funciona en paralelo al datalogger de HPTuners para comprobar la mezcla de combustible en varias regiones de operación. Esto es de suma importancia dada a la necesidad de mezcla rica y correcta en altas cargas y a su vez una comprobación de funcionamiento del sensor original que ayuda a mantener la mezcla estequiométrica. En este caso se instala un sistema marca AEM, modelo X-Series, numero de parte 30-0300, que incluye todo lo necesario para un funcionamiento fuera de la caja. Este incluye un sensor BOSCH 4.9 LSU, un monitor y el cableado necesario para su funcionamiento. En la instalación del sensor, este se ubica después del sensor original (Imagen 45). El cableado solo requiere 12 voltios de la llave de ignición y una conexión a negativo. Para esto se utiliza el cableado existente del vehículo, pero no utilizado (por ser una extra no instalada) y el monitor se ubica en una base en el centro de la consola (Imagen 46). Para la conexión con el datalogger, se debe instalar un par de cables con protocolo serial RS232 que se conecta directamente a la computadora durante el recorrido que se desea registrar

Imagen 45. Ubicación de los sensores de mezcla de combustible

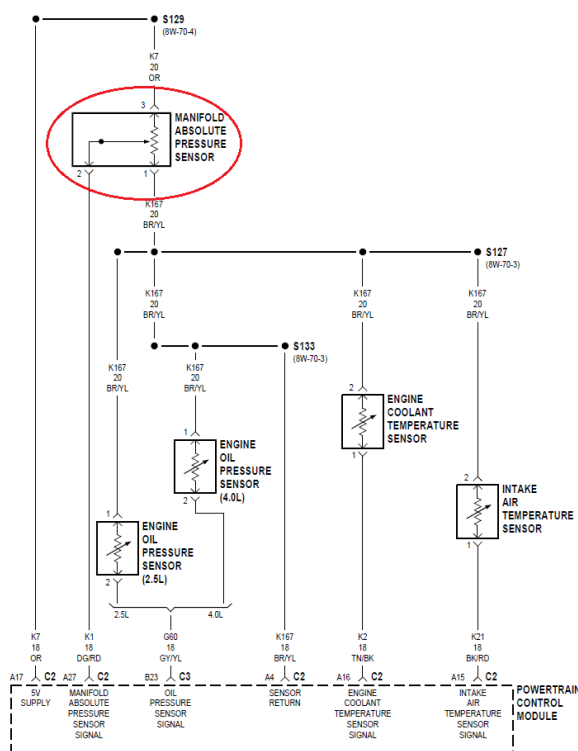


Imagen 46. Monitor del sensor de mezcla de combustible de banda ancha



El sensor de la presión absoluta al colector original de 1 Bar no da el rango de funcionamiento necesarios para la utilización del turbocompresor a la hora de presiones positivas con respecto a la atmosférica. Para esto se reemplaza por un sensor de 2 Bares, marca NTK modelo MA0181. Para esto se requiere instalar el conector correcto para dicho sensor, utilizando el método de conexión en paralelo al conector original para mantener el original en caso de que se desea eliminar el sistema de inducción forzada. El cableado consta de 3 hilos, donde uno son 5 voltios de referencia, otro es conexión a negativo y el tercero es voltaje variable según la presión que mide el sensor. Para esto se requiere el diagrama eléctrico (Imagen 47)

Imagen 47. Diagrama eléctrico del sensor de presión absoluta del colector original marcado con el óvalo rojo.



En la instalación del sensor de 2 Bares, se requiere una base soldada dada a la diferencia de estilo de sensor, donde esta se ubica en un espacio libre de las monturas del cable mecánico del acelerador. Luego se instala una tubería de vacío desde el colector de admisión al sensor para su referencia. Finalmente, el sensor original de 1 Bar se deja en su posición original y se le desconecta del cableado.

En la parte de software, es necesario tomar en cuenta que ahora todas las tablas relacionadas con el sensor de presión absoluta del colector están a la mitad del valor original, por ejemplo, si la referencia de 100kPa equivale a 5 Voltios del sensor, ahora este va a leer 2.5 Voltios. En caso de presión positiva con respecto a la presión atmosférica, este va a leer mayor a 2.5 voltios, por ejemplo 2 bares va a ser 5 voltios, aunque la computadora tenga en sus tablas 100 kPa. Esto es debido que la configuración de esta no permite la lectura de presión positiva mayor a 105 kPa. En general a grosso modo si hay 100 kPa en el colector, el sensor mide 2.5V y la computadora va a leer 50 kPa según el software. Si hay 200 kPa en el colector, el sensor mide 5v y la computadora va a leer 100kPa. Como desventaja se tiene una menor resolución a la hora de lecturas de tablas.

4.2.2.3.4 Sistema de ignición

Para el sistema de ignición, en su parte física no existieron cambios. En cambio, en su parte de software, existe un cambio significativo. Dada a la lectura de sensor MAP que es la mitad al sensor original, se tuvo que realizar una escala de 50%, perdiendo la mitad de la resolución de la tabla. Para esto, se hizo una aproximación con base a los puntos de operación del motor en su forma original. Esto es con base a su última modificación de la computadora realizada, con la versión MOD 5.3. La escala utilizada es con base al promedio de los datos, y su aproximación más cercana. Por ejemplo:

Tabla 8. Comparación de escala real contra escala del software

Escala en el software (kPa)	Escala real (kPa)
14.83	14.83
23.89	31.30
31.30	52.72
39.54	79.08
52.51	105.02
65.90	131.46
79.08	157.70
92.26	183.95
105.02	210.19

Esto es debido a la imposibilidad de modificar el software más profundamente. En general se toma mentalmente que a 105.02 kPa equivale a 210.19kPa, 52.51 a 105.02 y así sucesivamente.

Con base a esto, se tiene que la máxima presión atmosférica está en el rango de 105.02 kPa, pero equivale a 52.51 kPa visto en el software. Esto significa que se tiene la mitad de la tabla hecha con base al cambio de MOD5.3. De a partir de 52.51 del software se debe interpretar como presión positiva (a presión atmosférica a nivel del mar) realizada por el turbocompresor. Para esto se estima una reducción de aproximadamente 2 grados de avance por cada fila a partir de 52.51 kPa del software. Esto es con base a una salvaguarda del motor dada a la posibilidad de cascabeleo o detonaciones graves a la hora de la conducción a altos niveles de presión positiva. Dado que en algunas áreas de la tabla no es posible agregar números negativos, estos se mantienen en ceros. Esto se ve en la comparación de las tablas en la Imagen 3 contra la Imagen 48

También cabe destacar que existen trece versiones de cambios llamadas MOD1.X_BOOST. Donde MOD1.0_BOOST es la inicial con base a los cambios de MOD5.3. Para MOD1.0_BOOST se tiene como base para arranque, donde se modificaron todas las tablas relacionadas con el sensor MAP, que incluye, pero no se limita a tablas de ignición.

Imagen 48. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD1.0_BOOST

	512	704	800	896	992	1,120	1,248	1,504	1,760	1,984	2,240	2,496	3,008	3,488	4,000	4,480	4,992
14.8	24.5	25.0	25.5	26.0	29.0	32.5	35.5	37.5	40.0	42.5	44.5	45.5	46.0	46.0	46.0	46.0	46.5
23.9	23.0	24.5	26.5	29.5	34.0	37.5	39.5	41.5	43.5	45.5	47.5	48.5	49.0	47.5	47.0	48.5	49.5
31.3	20.0	22.0	24.0	26.0	33.0	35.5	37.0	38.5	40.5	42.5	44.5	46.0	46.5	45.0	44.5	45.5	47.0
40.0	10.5	11.5	13.0	15.0	22.5	24.0	26.0	28.0	30.5	32.5	33.5	34.5	34.5	34.0	34.0	35.5	37.0
53.0	5.5	6.0	7.0	7.5	15.5	17.0	18.5	21.0	24.0	26.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.5	32.5
66.1	2.5	3.0	4.0	4.5	12.5	14.0	15.5	18.0	21.0	23.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.5	29.5
79.2	0.0	0.0	1.0	1.5	9.5	11.0	12.5	15.0	18.0	20.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.5	26.5
92.3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	8.0	9.5	12.0	15.0	17.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.5	23.5
105.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	5.0	6.5	9.0	12.0	14.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.5	20.5

Luego de varias pruebas se nota cascabeleo en áreas de conducción comunes como en bajas RPM y alta carga, pero sin presión positiva, también a máxima potencia se oye detonaciones dañinas. La última versión estable es MOD1.13_BOOST (Imagen 49). Aquí se puede notar una reducción en áreas importantes y no se aprecia el cascabeleo ni detonaciones.

Imagen 49. Toma de pantalla de tabla de avance de ignición modificada MOD1.13_BOOST

	512	704	800	896	992	1,120	1,248	1,504	1,760	1,984	2,240	2,496	3,008	3,488	4,000	4,480	4,992
16.1	15.5	15.5	16.0	18.0	20.0	22.5	24.0	24.5	27.5	31.5	34.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	34.5
23.9	20.5	22.0	24.0	27.0	32.0	35.0	37.0	39.0	41.0	43.0	45.0	46.0	46.5	45.0	44.5	46.0	47.0
31.3	16.5	18.0	21.0	23.0	29.0	31.5	33.0	34.5	36.5	38.5	40.5	42.0	42.5	41.0	40.5	41.5	43.0
40.0	9.0	10.0	12.0	14.5	21.0	23.0	25.0	26.5	29.0	31.0	32.0	33.0	33.5	32.5	32.5	34.0	35.5
53.0	3.0	4.0	5.0	5.5	6.0	7.0	8.5	11.0	13.0	15.5	17.0	18.0	19.5	20.5	22.0	23.0	24.0
66.1	2.0	3.0	4.0	4.0	4.5	5.5	5.5	8.0	9.5	11.0	12.5	13.5	15.0	16.0	17.5	18.5	19.5
79.2	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.5	3.5	6.0	7.5	9.0	10.5	11.5	13.0	14.0	15.5	16.5	17.5
92.3	1.0	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	5.0	6.0	7.5	9.0	10.0	11.5	12.5	14.0	15.0	16.0
105.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	3.0	4.0	5.5	7.0	8.0	9.5	10.5	12.0	13.0	14.0

Imagen 50. Comparación de tabla de avance de ignición entre MOD1.0_BOOST VS MOD1.13_BOOST

	512	704	800	896	992	1,120	1,248	1,504	1,760	1,984	2,240	2,496	3,008	3,488	4,000	4,480	4,992
-9.0	-9.0	-9.5	-9.5	-8.0	-9.0	-10.0	-11.5	-13.0	-12.5	-11.0	-10.5	-10.5	-11.0	-11.0	-11.0	-11.0	-12.0
-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.0	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
-3.5	-4.0	-3.0	-3.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
-1.5	-1.5	-1.0	-0.5	-1.5	-1.0	-1.0	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.0	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
-2.5	-2.0	-2.0	-2.0	-9.5	-10.0	-10.0	-10.0	-11.0	-10.5	-10.5	-10.0	-9.0	-8.5	-7.5	-8.5	-7.5	-8.5
-0.5	0.0	0.0	-0.5	-8.0	-8.5	-10.0	-10.0	-11.5	-12.0	-12.0	-11.5	-10.5	-10.0	-9.0	-9.0	-10.0	
1.0	2.0	2.0	1.5	-6.5	-7.5	-9.0	-9.0	-10.5	-11.0	-11.0	-10.5	-9.5	-9.0	-8.0	-8.0	-9.0	
1.0	1.5	2.0	2.0	-4.5	-5.5	-7.0	-7.0	-9.0	-9.5	-9.5	-9.0	-8.0	-7.5	-6.5	-6.5	-7.5	
1.0	1.0	1.0	1.0	-2.5	-3.5	-5.5	-6.0	-8.0	-8.5	-8.5	-8.0	-7.0	-6.5	-5.5	-5.5	-6.5	

4.2.2.3.5 Sistema de inyección de combustible

Para el sistema de inyección de combustible, se tiene la misma situación con el sistema de ignición, con base a la misma escala del sensor MAP. Su única diferencia es las diferentes tablas modificadas que incluye, pero no se limita a tablas de inyección de combustible en lazo abierto, tablas de corrección en arranque frío, tablas de purga de arranque, tiempos de corrección a diferentes temperaturas de operación y factor de corrección barométrica.

Cabe destacar que la gran cantidad de versiones (de MOD1.0_BOOST a MOD1.13_BOOST) son por las correcciones a este sistema en específico. Esto tiene como razón una configuración de la mezcla correcta de combustible tanto en baja, media y alta carga del motor. También es de suma importancia tener una mezcla rica en lazo abierto para evitar problemas de detonaciones con presión positiva.

Imagen 51. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible
MOD1.0_BOOST

Old Absolute Pressure (kPa)	512	704	800	896	992	1,120	1,248	1,504	1,760	1,984	2,240	2,496	3,008	3,488	4,000	4,480	4,992
14.8	1.144	1.060	1.040	1.040	1.044	1.068	1.088	1.100	1.124	1.172	1.204	1.252	1.416	1.492	1.608	2.104	2.144
23.9	1.736	1.740	1.744	1.752	1.768	1.780	1.808	1.828	1.884	1.984	2.088	2.168	2.292	2.592	2.748	2.948	2.996
31.3	2.356	2.380	2.392	2.436	2.520	2.600	2.680	2.732	2.760	2.880	3.084	3.156	3.276	3.504	3.692	3.752	3.696
40.0	2.836	3.092	3.152	3.264	3.416	3.544	3.640	3.676	3.704	3.892	4.140	4.288	4.444	4.584	4.916	4.844	4.548
53.0	4.412	4.728	4.796	4.924	5.096	5.216	5.348	5.424	5.508	5.676	6.016	6.108	6.200	6.368	6.752	6.976	6.876
66.1	6.284	6.536	6.620	6.752	6.932	7.072	7.188	7.312	7.476	7.612	7.952	8.156	8.288	8.404	8.576	9.236	8.996
79.2	8.348	8.480	8.584	8.716	8.888	9.008	9.180	9.356	9.568	9.804	10.088	10.228	10.356	10.592	10.780	11.524	11.352
92.3	10.876	10.828	10.884	10.988	11.108	11.316	11.420	11.636	11.884	12.044	12.252	12.436	12.656	12.840	13.624	14.436	13.844
105.0	12.752	12.816	12.880	13.284	13.540	13.644	13.720	13.808	13.928	14.040	14.168	14.332	14.492	14.812	16.232	16.892	16.744

Imagen 52. Toma de pantalla de tabla de tiempos de inyección de combustible
MOD1.13_BOOST

Old Absolute Pressure (kPa)	512	704	800	896	992	1,120	1,248	1,504	1,760	1,984	2,240	2,496	3,008	3,488	4,000	4,480	4,992
16.1	0.624	0.612	0.592	0.624	0.588	0.496	0.508	0.516	0.536	0.556	0.584	0.616	0.652	0.712	0.808	0.904	0.972
23.9	1.172	1.184	1.204	1.276	1.328	1.188	1.240	1.256	1.308	1.368	1.452	1.500	1.528	1.592	1.588	1.604	1.560
31.3	1.816	1.908	1.984	2.024	2.056	1.860	1.916	1.956	1.988	2.048	2.152	2.192	2.172	2.216	2.284	2.388	2.244
40.0	3.064	2.948	3.004	3.036	3.116	2.692	2.724	2.868	2.960	3.052	3.164	3.244	3.240	3.200	3.404	3.564	3.612
53.0	6.192	5.916	6.360	6.180	6.684	6.464	6.544	6.828	6.992	6.972	7.048	7.164	7.296	7.668	8.156	8.472	8.352
66.1	8.340	8.404	8.528	8.692	8.892	9.052	9.192	9.360	9.536	9.544	10.040	10.228	10.400	10.632	10.976	11.520	11.536
79.2	10.592	10.696	10.824	10.984	11.188	11.352	11.556	11.776	12.028	12.308	12.616	12.836	13.028	13.308	13.716	14.340	14.248
92.3	13.436	13.504	13.600	13.780	13.964	14.172	14.340	14.560	14.820	15.052	15.288	15.524	15.776	16.148	17.020	17.756	17.500
105.0	16.064	16.140	16.324	16.684	17.016	17.172	17.280	17.396	17.536	17.688	17.848	18.044	18.296	19.000	20.192	21.012	21.100

Imagen 53 Comparación de tabla de apertura de inyectores entre MOD1.0_BOOST VS
MOD1.13_BOOST

Old Absolute Pressure (kPa)	512	704	800	896	992	1,120	1,248	1,504	1,760	1,984	2,240	2,496	3,008	3,488	4,000	4,480	4,992
-0.520	-0.448	-0.448	-0.416	-0.456	-0.572	-0.580	-0.584	-0.588	-0.616	-0.620	-0.636	-0.764	-0.780	-0.800	-1.200	-1.172	-1.172
-0.564	-0.556	-0.540	-0.476	-0.440	-0.592	-0.568	-0.572	-0.576	-0.616	-0.636	-0.668	-0.764	-1.000	-1.160	-1.344	-1.436	-1.436
-0.540	-0.472	-0.408	-0.412	-0.464	-0.740	-0.764	-0.776	-0.772	-0.832	-0.932	-0.964	-1.104	-1.288	-1.408	-1.364	-1.452	-1.452
0.228	-0.144	-0.148	-0.228	-0.300	-0.852	-0.916	-0.808	-0.744	-0.840	-0.976	-1.044	-1.204	-1.384	-1.512	-1.280	-0.936	-0.936
1.780	1.188	1.564	1.256	1.588	1.248	1.196	1.404	1.484	1.296	1.032	1.056	1.096	1.300	1.404	1.496	1.476	1.476
2.056	1.868	1.908	1.940	1.960	1.980	2.004	2.048	2.060	1.932	2.088	2.072	2.112	2.228	2.400	2.284	2.540	2.540
2.244	2.216	2.240	2.268	2.300	2.344	2.376	2.420	2.460	2.504	2.528	2.608	2.672	2.716	2.936	2.816	2.896	2.896
2.560	2.676	2.716	2.792	2.856	2.856	2.920	2.924	2.936	3.008	3.036	3.088	3.120	3.308	3.396	3.320	3.656	3.656
3.312	3.324	3.444	3.400	3.476	3.528	3.560	3.588	3.608	3.648	3.680	3.712	3.804	4.188	3.960	4.120	4.356	4.356

4.2.2.3.6 Sistema de admisión

En el sistema de admisión, como se puede ver en la parte de la implementación (Imagen 43 eImagen 44), fue necesaria la utilización de tubería nueva metálica de 2.5 pulgadas o 63.5 milímetros. Los acoples de silicón se utilizan para evitar quiebres de soldadura en caso de flexiones por torque entre el motor y la carrocería.

Luego, la implementación de un intercambiador de calor aire/agua, hace que la temperatura de la salida del compresor sea menor (causado por el aumento de presión) y así evitar detonaciones por carga de aire caliente y aumentar su densidad. Esto último se puede comparar en la Imagen 54 e Imagen 55 donde se aprecia una temperatura de 9 grados Fahrenheit o 5 grados Celsius.

Imagen 54. Registro de temperaturas con sistema de admisión original.

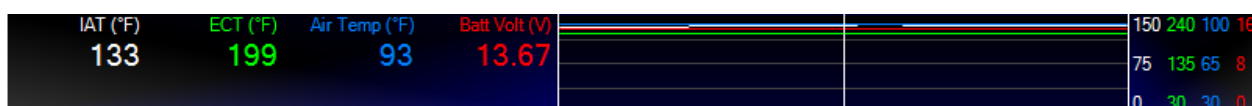


Imagen 55. Registro de temperaturas con sistema de admisión modificado incluyendo intercambiador de calor.



Aunque si exista un cambio de temperatura medible, este es muy variable a las condiciones del día, velocidad del aire a la admisión, respuesta del sensor y otras variables que probablemente influyan su medida. De igual manera, se demuestra que este sistema está en un funcionamiento correcto.

4.2.2.3.7 Sistema de escape

El sistema de escape se mantuvo todos los sistemas de emisiones existentes como catalizador y sensor de oxígeno antes y después del catalizador. Esto para mantener la conducción legal y eficiente a hora de la utilización del vehículo. Durante su construcción, se reutilizo gran parte del sistema de escape original, manteniendo el mismo diámetro de tubería de 2.25 pulgadas o 57.15 milímetros.

Imagen 56. Sistema de escape instalado



4.2.2.3.8 Otros puntos a destacar

Durante las pruebas y uso diario, se nota un incremento considerable de la temperatura en la pared del cortafuegos, especialmente en altas cargas del motor, creando poco confort a la hora de la utilización. Para esto se investiga y concluye que la carcasa de la turbina del turbocompresor está irradiando calor directamente a la cabina. Para solucionar esto, se le agrega un cobertor de fibra de vidrio y se reduce considerablemente la temperatura.

Imagen 57. Cobertor de fibra de vidrio instalado



Imagen 58. Fotografía termográfica después de la operación del vehículo

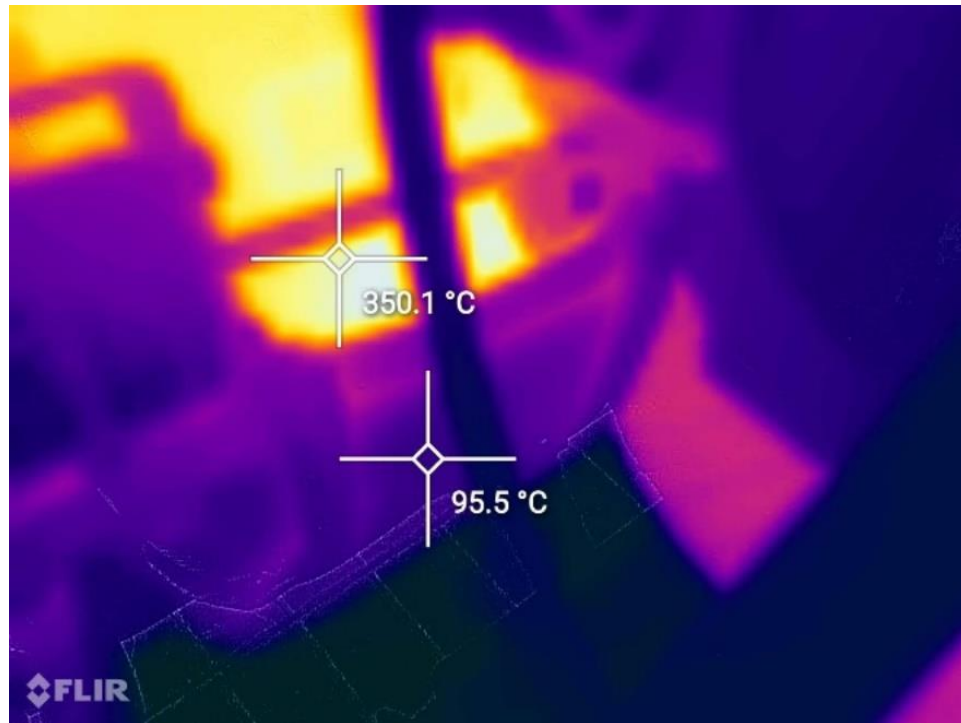
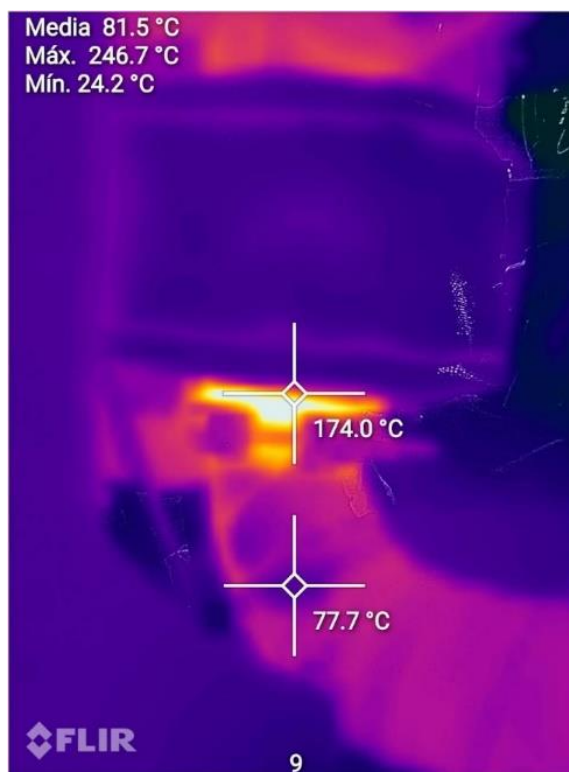


Imagen 59 Fotografía termográfica comparación entre acople de la turbina del turbocompresor y cobertor de turbina de fibra de vidrio.



Imagen 60. Fotografía termográfica comparación entre acople de la turbina del turbocompresor y cobertor de tubo de escape (bajante) fibra de vidrio.



Luego, otro punto importante a rescatar es la utilización de codos y acoples de buena calidad. Esto se notó en la primera instalación del sistema de admisión, en el codo antes de la boquilla de admisión. Se utilizó un codo flexible existente del sistema y se notaba una expansión a la hora de la presión positiva durante la carga del motor (Comparación entre Imagen 61 e Imagen 62) después de 6 meses, este fallo por fatiga del material y fue reemplazado por uno de un grosor mayor. Al momento de la instalación no se realizó ninguna modificación considerable que afectara el sistema de admisión existente.

Imagen 61. Primer codo instalado.



Imagen 62. Primer codo instalado expandido por la presión positiva.



Imagen 63. Primer codo instalado roto por fatiga.



Imagen 64. Segundo codo durante la instalación.



4.2.2.3.9 Comparación de datos

Con base a la Imagen 8, se puede notar un incremento de las RPM mucho más empinado en un menor tiempo, significando un aumento de potencia considerable. Utilizando la tabla de equivalencias del sensor de 2 BAR (Tabla 8), 58.9 kPa equivale aproximadamente 117.4 kPa reales o una presión positiva de 4 PSIG en ese momento

Imagen 65. Registro con MOD1.13_BOOST



Durante su uso, se operó a presiones máximas de 8 PSIG o 144 kPa aproximadamente. Como se puede notar en la Imagen 66, también se nota una mezcla rica y un avance de chispa de apenas 16 grados. Esto ayuda a evitar el cascabeleo o detonaciones. De igual manera la válvula de alivio está configurada a esta presión considerando la limitante de la utilización de combustible de bajo octanaje como lo es la gasolina comercialmente llamada plus 91 o “regular”.

Imagen 66. Ejemplo de operación a máxima capacidad con inducción forzada.



Otro punto para rescatar es la operación del motor a presiones superiores a la atmosférica, que esto equivale a trabajar el motor a una mayor relación de compresión por tener inducción forzada (Ganz, 2019). Esto es muy variable dependiendo del rango de operación y tiempo que se opera el motor. En general, el cálculo de la nueva relación de compresión o “relación de compresión efectiva” se puede calcular con la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Relación de compresión efectiva.

$$\text{Effective Compression} = ((\text{Boost PSI} / 14.7) + 1) * \text{Current Static Compression Ratio}$$

1 Bar = 14.5 PSI
1 Atmosphere = 14.7 PSI

Tomado de: <http://www.gtsparkplugs.com/EffectiveCompressionCalc.html>

Donde:

- Effective compression: Relación de compresión efectiva
- Boost PSI: Presión del colector sobre la presión atmosférica en PSI
- Current Static compression Ratio: Relación de compresión del motor actual (Actualmente 8.8:1 (Chrysler Corporation, 1998))
- 14.7: Presión atmosférica a nivel del mar en PSI.

Utilizando esta fórmula y con el registro a operación máxima (Imagen 66) se tiene una máxima relación de compresión efectiva de 13.59:1 aproximadamente, en operación sobre el nivel del mar. Esto equivale a 4.79 puntos más de compresión. También, a mayor compresión, mayor eficiencia térmica (DINH, s.f.). Esto es calculable con la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Eficiencia térmica del motor de ciclo Otto.

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Tomado de: <https://motoiq.com/compression-ratio-the-squish/2/>

Donde:

- η : Eficiencia térmica
- r: Relación de compresión
- k: Constante del aire (1.4)

Calculando con base a la relación original de 8.8:1, se tiene una eficiencia de apenas 58.1%, mientras con una Relación de compresión efectiva de 13.59:1 se tiene una eficiencia térmica de 64.8%, en general un aumento de 10.7% de eficiencia térmica teórica.

También es de notar que la operación a presión positiva solo aplica cuando se utiliza el motor al 100%, y no tiene efecto adverso en la utilización a bajas cargas como conducción normal en ciudad.

4.2.2.3.10 Consumo

En la parte de consumo en pruebas reales, se tiene un gran cambio, teniendo en cuenta que todavía se sigue cambiando parámetros de la parte de inyección de combustible, y algunos afinamientos en el sistema. Se puede ver que se tiene un consumo más constante, no tan variado y esto es contribuido a las etapas anteriores.

En la Tabla 9, se nota un promedio de 5.376 kilómetros/litro, mientras que en la Tabla 10 aumenta a 6.018 kilómetros/litro, un aumento de 0.642 kilómetros/litro, o una mejora de 11.94%. Esto se puede correlacionar con la mejora de 10.7% en la eficiencia térmica teórica, un cambio de conducción dado que es menor la necesidad de presionar el acelerador para mantener la velocidad y la mejora al sistema de inyección de combustible por el cambio de inyectores.

Tabla 9. Consumos previos a las modificaciones.

Fecha	Precio ₡/ℓ	Compra ₡	Mi	Km	ℓ medidos	Mi/ℓ	km/ℓ	MPG
20-Dec-19	₡618	20,000	126.2	203.1	32.36 ℓ	3.900	6.275	14.76
21-Ene-20	₡604	20,000	90.8	146.1	33.11 ℓ	2.742	4.412	10.38
1-Feb-20	₡623	20,000	123.7	199.0	32.10 ℓ	3.853	6.200	14.59
13-Feb-20	₡623	20,000	88.5	142.4	32.10 ℓ	2.757	4.436	10.44
25-Feb-20	₡623	20,000	105.9	170.4	32.10 ℓ	3.299	5.308	12.49
11-Mar-20	₡583	20,000	119.9	192.9	34.31 ℓ	3.495	5.624	13.23

Tabla 10. Consumos después de las modificaciones.

Fecha	Precio ₡/ℓ	Compra ₡	Mi	Km	ℓ medidos	Mi/ℓ	km/ℓ	MPG
9-Mar-21	₡628	₡31,000	177.5	285.6	49.37 ℓ	3.595	5.785	13.61
6-May-21	₡689	₡32,000	171.9	276.6	46.44 ℓ	3.701	5.956	14.01

24-Jun-21	€715	€31,499	176.2	283.5	44.06 ℓ	4.000	6.435	15.14
7-Jul-21	€711	€27,000	162.0	260.7	37.98 ℓ	4.266	6.863	16.15
17-Ago-21	€727	€35,000	145.0	233.3	48.15 ℓ	3.012	4.846	11.40
9-Sep-21	€718	€30,000	161.6	260.0	41.79 ℓ	3.867	6.223	14.64

4.2.2.3.11 Emisiones

El día 2 de diciembre de 2021 se realizó la inspección técnica vehicular, con las tres etapas de modificaciones. Durante la inspección, como es de rutina, se realiza las pruebas en ralentí y acelerado, donde estas pasaron satisfactoriamente. Los resultados de estos están en la Tabla 11 .

Tabla 11. Emisiones después de las tres etapas.

Fecha	Odómetro	COR %	HCR p.p.m	CO2R %	LAMB R	COA %	HCA p.p.m	CO2A %	LAMBA
2/12/2021	186438	0.2	53	13	1.19	0.2	12	12	1.2

Comparando con la Tabla 4, no existe gran cambio alguno tanto en monóxido y dióxido de carbono, en ralentí como acelerado. Solo cabe destacar que los hidrocarburos medidos son menores en al menos 46% en ralentí y 41% acelerado, comparado con la etapa anterior. Además, son los datos más bajos desde que se tiene registro. Esto significa que en general, la inducción forzada si contribuye en gran medida a unas emisiones más bajas

4.2.2.3.12 Costo

El costo de la implementación de inducción forzada es considerablemente mayor, dado que los componentes son costosos. Por ejemplo, solo el turbocompresor tiene un precio de €132,743.36, luego está el costo agregado para hacer funcionar este dispositivo, como sensores, específicamente el de banda ancha, que, por ser de buena calidad, tiene un precio similar al del turbocompresor, de €126,460.17. Estos productos fueron comprados el 1ero de diciembre del 2021 y están dispuestos a cambios por el tipo de cambio entre colones y dólares.

Luego está el costo de instalación, pero no se cobra mano de obra dada a la instalación propia. De igual manera se estima un costo de instalación aproximado de €500.000 en mano de obra y consumibles como soldadura, y otros.

En conclusión, la sumatoria de precios de esta etapa y las dos anteriores es de €683,997.31 aproximadamente. Esto se puede ver detalladamente en la Tabla 3

4.3 Análisis de resultados

4.3.1 Potencia

4.3.1.1 Original

Se tiene una potencia estimada de 190 caballos de fuerza. Con base a las pruebas, se toma aproximadamente 3.540 segundos de 30 a 45 kilómetros por hora.

4.3.1.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora

Con base a las pruebas, se toma aproximadamente 2.000 segundos 30 a 45 kilómetros por hora. Esto equivale a una disminución de 1.540 segundos con base al original.

4.3.1.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.

Dado que no existió variación de cambios en comparación a la etapa anterior, a diferencia de los inyectores, de igual manera se toma aproximadamente 2.000 segundos de 30 a 45 kilómetros por hora. Esto equivale a una disminución de 1.540 segundos con base al original.

4.3.1.4 Etapa 3. Inducción forzada

Con base a las pruebas, se toma aproximadamente 1.670 segundos de 30 a 45 kilómetros por hora. Esto equivale a una disminución de 1.870 segundos con base al original.

4.3.2 Consumo

4.3.2.1 Original

Se tiene un promedio de 5.36 kilómetros por litro.

4.3.2.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora

No existe variación significativa en tiempos de inyección comparado con el original. Tampoco se tiene medida confiable de largo plazo para punto de comparación con base al original.

4.3.2.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.

Los tiempos de inyección son menores dado que los inyectores son de mayor capacidad al original. Pero no se tiene medida confiable de largo plazo para punto de comparación con base al original.

4.3.2.4 Etapa 3. Inducción forzada

Se tiene un promedio de 6.018 kilómetros por litro. Esto es un incremento de 0.642 kilómetros/litro, o una mejora de 11.94%.

4.3.3 Emisiones

4.3.3.1 Original

Se tiene las siguientes emisiones:

Fecha	Odómetro	COR %	HCR p.p.m	CO2R %	LAMB R	COA %	HCA p.p.m	CO2A %	LAMBA
12/12/2019	184646	0.1	72	15	1.02	0.2	15	14	1.06
12/12/2018	182529	0.1	106	14	1.02	0.3	22	13	1.15

De igual manera, En operación normal siempre se mantuvo en mezcla estequiométrica.

4.3.3.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora

El cambio de tiempo de ignición realizados no tiene efecto significativo para un cambio de emisiones. En operación normal siempre se mantuvo en mezcla estequiométrica.

4.3.3.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.

Se tiene las siguientes emisiones

Fecha	Odómetro	COR %	HCR p.p.m	CO2R %	LAMB R	COA %	HCA p.p.m	CO2A %	LAMBA
3/12/2020	185452	0.1	114	14	1.03	0.1	29	13	1.1

De igual manera, En operación normal siempre se mantuvo en mezcla estequiométrica.

4.3.3.4 Etapa 3. Inducción forzada

Se tiene las siguientes emisiones

Fecha	Odómetro	COR %	HCR p.p.m	CO2R %	LAMB R	COA %	HCA p.p.m	CO2A %	LAMBA
2/12/2021	186438	0.2	53	13	1.19	0.2	12	12	1.2

De igual manera, En operación normal siempre se mantuvo en mezcla estequiométrica.

4.3.4 Costo

4.3.4.1 Original

Técnicamente se inicia en 0, dado que no se le ha incluido ni comprado ninguna modificación.

4.3.4.2 Etapa 1. Cambios en el software de la computadora

Solo se le suma el precio del Dispositivo de modificación y recolección de datos HPTuners MPVI2 más un token de utilización. El precio es de ₡281,700.13

4.3.4.3 Etapa 2. Cambios de inyectores.

Solo se le suma el precio de los inyectores. El precio es de ₡28,540.03

4.3.4.4 Etapa 3. Inducción forzada

Es el Turbocompresor, Kit sensor de mezcla de combustible banda ancha, Sensor MAP 2 Bares, Manga recta silicón 3" (76mm), Manga recta silicón 3.5" (89mm), Codo 90 Hierro negro 1-1/2, Codo 45 Hierro negro 1-1/2, Tee Hierro negro 1-1/2, Conector Sensor MAP con un costo de ₡373,757.15. No incluye accesorios como el cobertor de turbocompresor, la fibra de vidrio, ni otros útiles que no aportan al funcionamiento básico del turbocompresor.

Capítulo V. Conclusiones, recomendaciones e implementación del proyecto

5.1 Conclusiones

- Al adelantar la chispa mediante el software en áreas específicas, se disminuyó el tiempo en la prueba de 30 a 45 kilómetros por hora en 1.540 segundos con respecto al original.
- Al disminuir los tiempos de encendido de inyectores, en áreas específicas utilizando el software, se obtuvo resultados poco visibles, pero sin efectos contrarios.
- El remplazo de los inyectores mejoró el comportamiento del motor, específicamente en áreas de ralentí, sin efectos adversos significantes en las emisiones.
- Al implementar el sistema de inducción forzada con base al diseño realizado, se registró una disminución de 1.870 segundos con respecto al original, en la prueba de 30 a 45 kilómetros por hora.
- Al instalar el sensor de oxígeno de banda ancha, se tiene mayor control de la mezcla de combustible y aire. Y esto permite modificar las tablas de combustible más puntualmente.
- La comparación de datos como presión en admisión, velocidad, posición del acelerador y demás, resultaron esenciales para entender la ganancia en autonomía y potencia, que a su vez se traduce en eficiencia. Aumentando la autonomía en 0.642 kilómetros/litro, o una mejora de 11.94% al implementar los cambios en el software, cambio de inyectores e implementación de la inducción forzada.
- Se incrementó la eficiencia térmica teórica en un 10.7%, pasando de 58.1% a 64.8%, con el aumento de la presión en la admisión con la implementación del turbocompresor.

5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda realizar las mismas pruebas en las etapas 1 y 3, utilizando gasolina con mayor octanaje, como lo es de 95 octanos, comercialmente llamada “super”.
2. Se recomienda realizar las mismas pruebas de la etapa 3 con mayor presión en la admisión para tener mayor ganancia de potencia y aumentar su eficiencia térmica.
3. Se recomienda utilizar una computadora moderna y programable para tener mayor resolución en tablas y un control de avance de chispa y de combustible mayor.
4. Se recomienda la instalación de sensores de cascabeleo y detonación adaptado a la recomendación anterior para si facilitar los cambios en el software
5. Se recomienda cambiar el empaque de cabezote, con tornillos de cabezote para tener el factor de seguridad de evitar fallos por fatiga por el uso antes de estas modificaciones.
6. Se recomienda realizar la prueba de la segunda etapa con inyectores más actualizados con mayor número de orificios para probar la eficacia de una mejor atomización.

5.3 Implementación del proyecto

5.3.1 Primera etapa. Cambios en el software de la computadora

5.3.1.1 Partes requeridas:

- Computadora con conexión a internet
- Hardware de HPTuners MPVI2
- Software de HPTuners VCM Editor BETA y VCM Scanner BETA
- Cable USB.
- Vehículo para programar (Jeep Wrangler 1998).

5.3.1.2 Procedimiento:

1. Confirmar tener todas las partes requeridas
2. Descargar el software de HPTuners
3. Conectar el hardware al puerto OBD2 del vehículo (Debajo del dash del lado del conductor).
4. Conectar por medio del cable USB el hardware a la computadora
5. Abrir el software de HPTuners VCM Editor BETA.

6. Descargar el archivo original del vehículo en la opción de “Read Vehicle” siguiendo los pasos requeridos en el software (ignición apagada, luego encendida y esperar 4 minutos)
7. Guardar el archivo original y realizar TRES copias de este. Recomendación: Guardar dos de las copias en lugares diferentes (En la nube, correo electrónico, llave maya y/o computadora) y con nombre característico del vehículo incluyendo que sea el archivo original.
8. Utilizar una de las copias para modificaciones y versiones de cambios a como guste.
9. Guardar el archivo con otro nombre para diferenciarlo del original.
10. Empezar a modificar el archivo a como guste.
11. Volver a guardar el archivo modificado.
12. Arrancar el vehículo por 5 a 10 minutos, asegurándose que la batería este cargada.
13. Apagar el vehículo.
14. Dar la opción de “write vehicle” para subir el archivo modificado y seguir las instrucciones que requiere en el software (ignición apagada, luego encendida y esperar 4 minutos)
15. Abrir el software de HPTuners VCM Scanner BETA y seguir las instrucciones en el software para conectar.
16. Probar el archivo modificado con el vehículo en neutro asegurándose que arranque correctamente.
17. Probar el vehículo en la calle

5.3.2 Segunda etapa. Cambios de inyectores

5.3.2.1 Partes requeridas:

- Inyectores EV1.
- Herramientas manuales (Alicate de puntas, desatornillador plano, caja de cubos hexagonales)
- Paño absorbente
- Implementos de seguridad (Guantes, anteojos de seguridad, etc.)

5.3.2.2 Procedimiento:

1. Abrir la tapa del motor

2. Numerar y desconectar los conectores de los inyectores originales.
3. Utilizar una llave 10mm para remover el soporte del cable mecánico del acelerador
4. Desconectar la punta del cable del acelerador ubicada en la boquilla de admisión
5. Purgar la presión en caso de que exista en el sistema removiendo la tapa de purga.
6. Remover los tres tornillos que sostienen en riel de inyectores con un cubo 8mm
7. Remover el riel de inyectores.
8. Remover los clips que sostienen los inyectores en riel de inyectores
9. Remover los inyectores
10. Limpiar el área donde se ubicaban los inyectores para evitar daños en los empaques
11. Lubricar los empaques de los inyectores nuevos con vaselina
12. Instalar los inyectores nuevos en el riel
13. Instalar los clips que sostienen los inyectores al riel
14. Instalar el riel de inyectores
15. Instalar los tres tornillos que sostienen el riel de inyectores
16. Utilizar una llave 10mm para instalar el soporte del cable mecánico del acelerador
17. Desconectar la punta del cable del acelerador ubicada en la boquilla de admisión
18. Conectar los conectores de los inyectores.
19. Purgar sistema activando ignición y oyendo que la bomba active. Realizarlo al menos 3 veces oyendo como cambia la carga de la bomba de gasolina
20. Revisar que no existan fugas. En caso de, arreglar el problema
21. Modificar el programa de la computadora haciendo el procedimiento de la primera etapa.
22. Probar y verificar funcionamiento de estos con pruebas en ralentí y en calle
23. Verificar nuevamente que no existan fugas. En caso de, arreglar el problema.

5.3.3 Tercera etapa. Inducción forzada

5.3.3.1 Partes requeridas:

- 2 codos 90 grados de 1-1/4 pulgadas o equivalente métrico, cedula 40, acero al carbón.
- 6 codos 45 grados de 1-1/4 pulgadas o equivalente métrico, cedula 40, acero al carbón.

- 4 Tees de 1-1/4 pulgadas o equivalente métrico, cedula 40, acero al carbón.
- Tubo de 1-1/4 pulgadas o equivalente métrico, cedula 40, acero al carbón.
- Herramientas manuales (Alicate de puntas, desatornillador plano, caja de cubos hexagonales)
- Turbocompresor previamente diseñado
- Sensor de oxígeno banda ancha
- Codos de silicón de varios tamaños
- Tubería recta y con codos, de metal para escape
- Intercambiador de calor
- Bomba de agua para el intercambiador de calor
- Objetos misceláneos metálicos (platinas, varillas, etc.)
- Colector de escape original para desarmar.
- Herramientas eléctricas (Esmeril, tronzadora, taladro, con sus respectivos consumibles.)
- Paño absorbente
- Implementos de seguridad (Guantes, anteojos de seguridad, etc.)
- Manual de servicio del vehículo

5.3.3.2 Procedimiento:

1. Desconectar la batería
2. Siguiendo el manual de servicio del vehículo, desarmar el Colector de admisión, el de escape e identificar tuberías necesarias.
3. Cortar para rescatar el adaptador del Colector de escape.
4. Siguiendo el diseño del Colector de escape, armar con los codos de 1-1/4 o equivalente métrico. Primero apuntalar con soldadura y probar con el turbocompresor instalado
5. En caso del que el paso anterior no cumpla con medidas correctas, volver a realizar los cambios respectivos removiendo los puntos de soldadura y repetir el paso
6. En caso de que el paso 5 si cumpla con las medidas correctas, soldar completamente el Colector de escape.
7. Instalar el Colector de escape al motor siguiendo las instrucciones del manual de servicio del vehículo.

8. Construir la tubería de la salida de la turbina (bajante) al sistema de escape original.
9. Instalar el colector de admisión motor siguiendo las instrucciones del manual de servicio del vehículo.
10. Instalar el intercambiador de calor en el compartimiento del motor
11. Instalar la tubería necesaria del depurador con filtro a la entrada del compresor del turbocompresor
12. Instalar la tubería necesaria de la salida del compresor del turbocompresor al intercambiador de calor
13. Instalar la tubería necesaria del intercambiador de calor a la boquilla de admisión
14. Instalar las tuberías de vacío y presiones necesarias a la válvula de alivio del turbocompresor al colector de admisión
15. Revisar que los conectores eléctricos, gomas, tuberías y demás estén conectadas, socadas y sin fugas.
16. Instalar la línea de aceite del block del motor al turbocompresor
17. Conectar la salida de aceite del motor de vuelta al motor
18. Modificar el programa de la computadora haciendo el procedimiento de la primera etapa.
19. Probar y verificar funcionamiento de estos con pruebas en ralentí y en calle
20. Verificar nuevamente que no existan fugas. En caso de, arreglar el problema.
21. Si el vehículo empieza a detonar en alta carga, **PARAR INMEDIATAMENTE**, levantando el acelerador y luego ajustar el avance de chispa con el software siguiendo el paso 18. Realizar cuantas veces sea necesario. En caso contrario es **MUY** posible quebrar los pistones y producir otros daños internos al motor con falla catastrófica.

Referencias

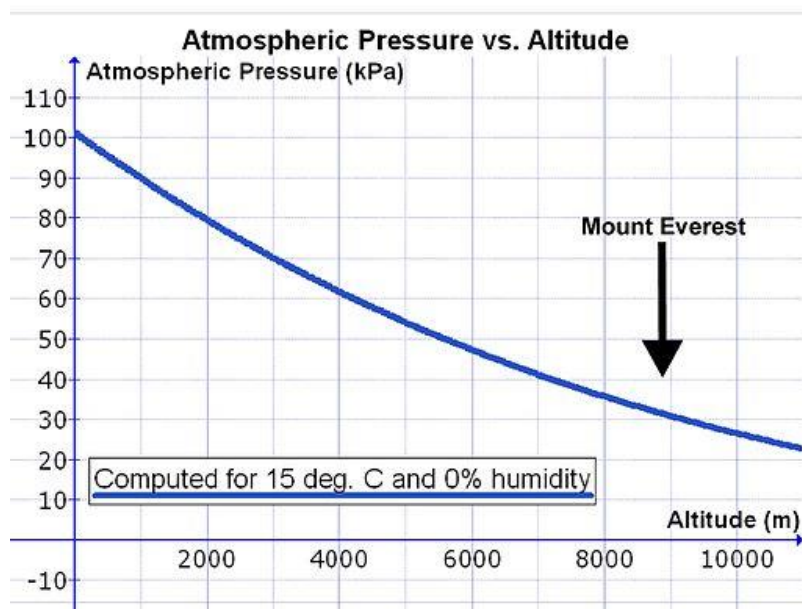
- Arias-Paz Guitian, M. (1996-1997). *Manual de Automóviles* (Quincuagésimo segunda ed.). Madrid, España: CIE. SL. DOSSAT 2000. Recuperado el Mayo de 2020
- Auto ABC. (11 de Agosto de 2020). *Auto ABC*. Obtenido de <http://www.auto-abc.eu/Jeep-Wrangler/v7536-1996>
- AutoAvance. (3 de Julio de 2012). *AutoAvance*. Obtenido de <https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/89-avance-del-encendido/>
- Barrantes, R. (2002). *Un camino al conocimiento, un enfoque cualitativo y cuantitativo*. San José: EUNED.
- Cambios, C. d. (25 de Noviembre de 2012). <https://www.mecanicoautomotriz.org/>. Obtenido de <https://www.slideshare.net/maicolpoloarmas/cajadecambiosmecanica1>
- Chrysler Corporation. (1998). *Service Manual. 1998 Jeep Wrangler*. Chrysler Corporation.
- Chrysler. (s.f de s.f de s.f). *wranglerforum*. Obtenido de <https://wranglerforum.com/attachments/stoichiometric-af-ratio-pdf.128512/>
- CUPLER, J. (s.f de s.f de s.f). *It Still Runs*. Obtenido de <https://itstillruns.com/jeep-40l-engine-specs-7328549.html>
- DINH, K. (s.f. de s.f. de s.f.). *motoiq*. Obtenido de [motoiq: https://motoiq.com/compression-ratio-the-squish/2/](https://motoiq.com/compression-ratio-the-squish/2/)
- Directivos, R. (12 de Marzo de 2018). *retos-directivos*. Obtenido de https://retos-directivos.eae.es/principales-diferencias-entre-el-van-y-el-tir/#Que_son_el_VAN_y_el_TIR
- Ganz, S. (s.f. de s.f. de 2019). *GTSparkplugs*. Obtenido de [GTSparkplugs: http://www.gtsparkplugs.com/EffectiveCompressionCalc.html](http://www.gtsparkplugs.com/EffectiveCompressionCalc.html)
- GARRETT MOTION INC. (s.f de s.f de 2017). Turbo Tech 103. Estados Unidos de Norte America.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de las investigacion*. Mexico D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- INECC. (ND). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares*. Ciudad de Mexico: INECC.

- Injector Planet. (s.f de s.f de s.f). *InjectorPlanet*. Obtenido de <https://www.injectorplanet.com/products/siemens-53030778>
- MacInnes, H. (1994). *Manual de turbocargadores*. Estado de Mexico: Pretice-Hall Hispanoamerica.
- MDNS. (s.f. de s.f. de s.f.). *mdns*. Obtenido de CAJA DE TRANSFERENCIA: <http://mdns.com.ar/BiblioBacac/Manual%20desarme%20y%20ajuste%20caja%20transferencia%20Dana%2018.pdf>
- obd2-elm327. (s.f de s.f de s.f). *obd2-elm327*. Obtenido de <https://obd2-elm327.es/sistema-obd2-historia-descripcion-futuro>
- Rafael Morales, M. Y., & Hernández Guzmán, A. (2014). *CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE*. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Sanfandila: INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.
- Rentar Fuel Catalyst. (27 de Junio de 2018). *Rentar Fuel Catalyst*. Obtenido de <https://rentar.com/efficient-engines-thermodynamics-combustion-efficiency/>
- Riteve SyC . (27 de Febrero de 2021). *rtv*. Obtenido de <https://www.rtv.co.cr/>
- Robert Bosch GmbH. (2002). *Electronic Automotive Handbook* (Primera ed.). Alemania: Bosch GmbH.
- Sánchez, E. (2011). *Sistemas auxiliares del motor*. Madrid: Macmillan Iberia, S.A. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/bibliouia/52815?page=411>
- Secundino, E. (2011). *Motores*. Madrid: Macmillan Iberia, S.A. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/bibliouia/101844?page=250>
- wacked. (3 de Agosto de 2011). *Jeep Stokers*. Obtenido de <https://www.jeepstokers.com/forum/viewtopic.php?t=2363#:~:text=2.5L%20I4%2C%20340%20lbs.&text=4.0L%20I6%2C%20515%20lbs.&text=Chevy%204.3L%20V6%2C%20425%20lbs.>

Anexo

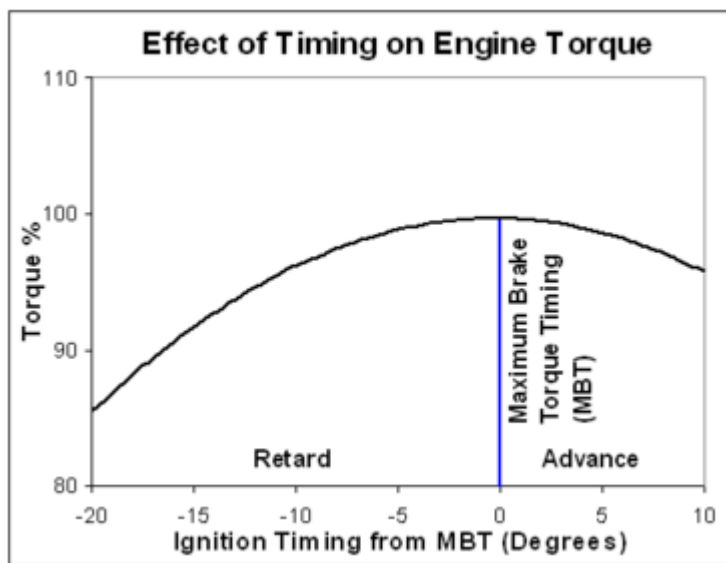
Figuras

Figura 1. Tabla de relación Presión atmosférica y altura sobre el nivel del mar



Tomado de: <https://www.aristasur.com/contenido/presion-atmosferica-y-variacion-de-oxigeno-en-altura>

Figura 2. Máximo torque al freno de un motor de combustión interna



Tomado de: <http://www.daytona-sensors.com/engine-tuning-and-recommended-guidelines.html>

Imágenes:

Imagen 67. Fotografía previa al desensamble.

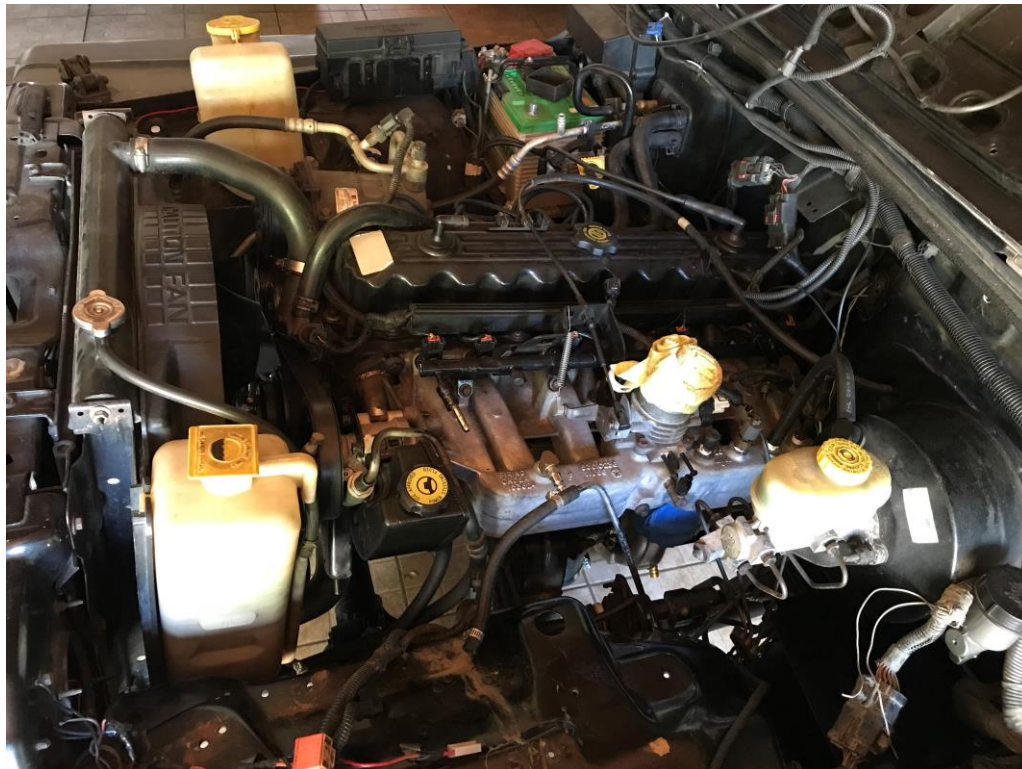


Imagen 68. Fotografía del sistema de la válvula de alivio

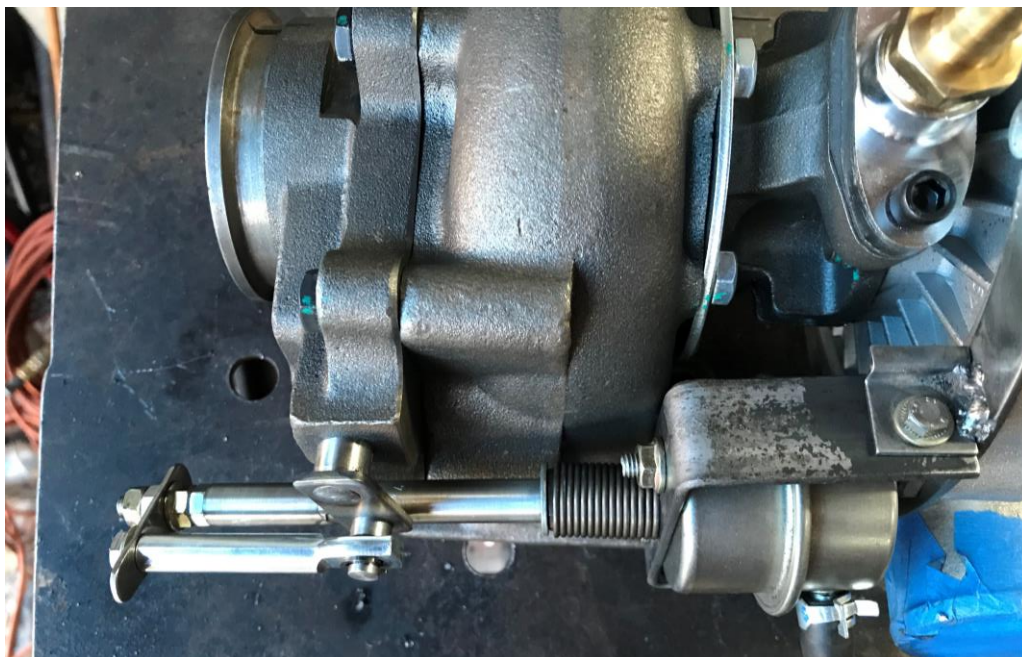


Imagen 69. Fotografía del compresor del turbocompresor.



Imagen 70. Fotografía del sensor MAP nuevo de 2 Bares.



Imagen 71. Fotografía mostrando presión positiva en el manómetro de la izquierda y monitor digital del sensor de banda ancha en el centro



Imagen 72. Fotografía endoscópica de la corona del pistón dentro del cilindro luego de 2000 kilómetros con el turbocompresor.

