



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL TICOMAN**

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ESCAPE PARA UN MOTOR ECOTEC 2.2L CON TURBOCOMPRESOR

INTEGRANTES:

Fragoso Alcántara Román Alonso

Rivera Domínguez Braulio

Rodríguez Delgado Miguel Ángel

ASESORES:

Ing. Adolfo Cruz Osorio

M. en C. Héctor Díaz García

México, DF, 26 de junio de 2008

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD TICOMÁN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: INGENIERO EN AERONÁUTICA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN: CURRICULAR
DEBERÁ PRESENTAR: LOS CC.. PASANTES:
FRAGOSO ALCÁNTARA ROMÁN ALONSO
RIVERA DOMÍNGUEZ BRAULIO
RODRÍGUEZ DELGADO MIGUEL ÁNGEL

TESINA

“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ESCAPE CON TURBOCARGADOR PARA MOTOR ECOTEC”

GLOSARIO DE TÉRMINOS
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS
LISTA DE TABLAS
LISTA DE FIGURAS
INTRODUCCIÓN
JUSTIFICACIÓN
OBJETIVO GENERAL
OBJETIVOS ESPECÍFICOS
HIPÓTESIS
MARCO TEÓRICO
ALCANCE
METODOLOGÍA
CAPITULADO
CONSIDERACIONES DE DISEÑO
DISEÑO DEL SISTEMA DE ESCAPE
ANÁLISIS DEL SISTEMA
PROCESO DE MANUFACTURA
PLAN DE ENSAMBLE DEL SISTEMA
CONCLUSIONES
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO I
CAPÍTULO II
CAPÍTULO III
CAPÍTULO IV
CAPÍTULO V

México, DF., a 27 de junio de 2008.

A S E S O R E S


ING. ADOLFO CRUZ OSORIO


M. EN C. HÉCTOR DÍAZ GARCÍA

Vo. Bo.

ING. MIGUEL ALVAREZ MONTALVO
DIRECTOR



I. P. N.
ESCUELA SUPERIOR DE
INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD TICOMÁN
DIRECCIÓN

Índice

Glosario de Términos	3
Glosario de Acrónimos	5
Lista de tablas	6
Lista de figuras	6
Introducción	11
• Justificación	12
• Objetivo General	15
• Objetivos Específicos	15
• Hipótesis	15
• Marco Teórico	16
• Alcance	28
• Metodología	29
• Capitulado	30
Capitulo 1 Consideraciones de diseño	31
1.1 Sistemas de escape automotrices	32
1.2 Características de las válvulas de alivio	36
1.3 Características del motor ecotec	40
1.4 Características del sistema de escape original	41
1.5 Características del turbocompresor	45
Capitulo 2 Diseño del sistema de escape	49
2.1 Diseño conceptual	50
2.2 Calculo	53
2.3 Modelado del sistema	57
Capítulo 3 Análisis del sistema	74
3.1 Análisis estructural	75
3.2 Análisis de flujo	87
Capítulo 4 Proceso de manufactura	95
4.1 Selección del proceso de manufactura	96
4.2 Creación del prototipo rápido	96
4.3 Manufactura	100
Capitulo 5 Plan de ensamble del sistema y fin de vida	107
Conclusiones	120
Recomendaciones para futuros estudios	122
Referencias bibliográficas	123

*A nuestros padres, que nos dieron la vida
Y nos forjaron como los hombres
Que ahora somos.*

Glosario de Términos

Brida: Elemento de unión entre tuberías.

Catalizador: Dispositivo que tiene la función de disminuir los elementos polucionantes contenidos en los gases de escape de un vehículo mediante la técnica de la catálisis.

Cilindro: Cámara tubular en la que se mueve en sentido alternativo el émbolo de un motor o bomba.

Conducto: Canal, comúnmente cubierto, que sirve para dar paso y salida a un fluido.

Contrapresión: El regreso de los gases de escape hacia la cámara de combustión durante el traslape de válvulas se llama.

Combustión: Conjunto de fenómenos producidos al mezclarse un cuerpo con oxígeno.

Compresor: Es aquella máquina que permite comprimir el aire que será entregado a la cámara de combustión del motor.

Diafragma: Dispositivo que regula la apertura de un sistema, en el caso particular de las válvulas es aquel que regula el paso de los fluidos en un sistema, y forma parte de las válvulas.

Fluido: Es aquel cuerpo que cuyas moléculas tienen entre sí poca o ninguna coherencia, y toma siempre la forma del recipiente que lo contiene.

Motor: Es una máquina capaz de transformar la energía almacenada en combustibles, baterías u otras fuentes, en energía mecánica capaz de realizar un trabajo. En los automóviles este efecto es una fuerza que produce el movimiento.

Par motor: Es el momento que es capaz de ejercer un motor en cada giro.

Presión: Cociente de la fuerza ejercida por un fluido sobre determinada superficie y esta misma superficie.

Potencia: Es la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo. Esto es equivalente a la velocidad de cambio de energía en un sistema o al tiempo empleado en realizar un trabajo.

Rugosidad: Condición que presentan los materiales o cualquier tipo de superficie de tener asperezas.

Sensor: Dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas.

Turbina: Es el nombre genérico que se da a la mayoría de las turbomáquinas motoras. Éstas son máquinas de fluido, a través de las cuales pasa un fluido en forma continua y este le entrega su energía a través de un rodete con paletas o álabes.

Turbocompresor: Es el conjunto entre compresor y sobrealimentador.

Válvula: Dispositivo que regula el paso de líquidos o gases en uno o varios tubos o conductos.

Válvula de alivio: Es una válvula que desvía o aleja los gases de escape de los de la turbina en un sistema turbocargado. Esta desviación permite que se reduzca la velocidad de giro de la turbina, misma que a su vez reduce la velocidad de giro del compresor.

Glosario de Acrónimos

AWS	American Welding Society
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computer Fluid Dynamics
CHRA	Center Housing & Rotating Assembly
CID	Cubic Inches Displacement
DOHC	Double Over Head Cam
ESIME	Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
EUA	Estados Unidos de América
GM	General Motors
IPN	Instituto Politécnico Nacional
MEF	Método del Elemento Finito
MIG	Metal Inert Gas
NHRA	National Hot Rod Association
PACE	Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education
PLM	Product Lifecycle Management
SJTU	Shanghai Jiao Tong University

Lista de tablas

Tabla 1 Ficha técnica del motor Ecotec 2.2L. Ref. 10	39
Tabla 2 Especificaciones del turbocompresor GT3782. Ref. 11.....	41
Tabla 3 Parámetros de diseño.....	50
Tabla 4 Dimensiones de los tubos del sistema.....	55
Tabla 5 Convención de capas (layers) para Unigraphics	58
Tabla 6 Resultados del análisis estructural	84
Tabla 7 Tornillería para la instalación del sistema de escape	108

Lista de figuras

Fig. 1 Soldadura MIG.....	21
Fig. 2 Diagrama del equipo MIG	22
Fig. 3 Tipos de zonas	23
Fig. 4 Transferencia Spray	24
Fig. 5 Transferencia Globular	24
Fig. 6 Transferencia por corto circuito	24
Fig. 7 Secuencia de voltaje y corriente	25
Fig. 8 Grafica voltaje vs. Corriente.....	26
Fig. 9 Barrera aerodinámica que reduce la contrapresión. Ref. 1	32
Fig. 10 Soldadura entre la brida de salida de la turbina y el tubo de escape. Ref. 1	34
Fig. 11 Sistema de escape del motor Ecotec 2.0 supercargado. Ref. 6.	36
Fig. 12 GM Cobalt con motor Ecotec. Ref. 7	37
Fig. 13 Cobalt de alto desempeño que corrió en las planicies de sal en Boneville. Ref. 8.....	37
Fig. 14 Corte del motor Ecotec 2.2L. Ref. 8.....	38
Fig. 15 Tubos de escape originales del Ecotec. Ref.9.....	40
Fig. 16 Múltiple original del Ecotec hecho de fundición de acero. Ref.9.....	40
Fig. 17 Vista del compresor del GT3782. Ref. 11.....	42
Fig. 18 Vista de la turbina del GT3782. Ref. 11.....	42

Fig. 19 Gráfica de desempeño de la turbina del GT3782. Ref. 11.....	42
Fig. 20 Mapa de desempeño del compresor del GT3782. Ref. 11	43
Fig. 21 Dimensiones de las entradas y salidas del compresor, turbina y aceite. Ref. 11.....	44
Fig. 22 Diferentes configuraciones de posición del tubo de la válvula de alivio en el múltiple. Ref. 1.....	45
Fig. 23 Nótese los tubos de escape independientes para las válvulas de alivio. Ref. 1.....	46
Fig. 24 Diferentes ángulos de salida para la válvula de alivio. Ref. 1.....	46
Fig. 25 Imágenes de las válvulas de alivio modelo F40. Ref. 12.....	47
Fig. 26 Esquema de instalación de la válvula de alivio. Ref. 12	48
Fig. 27 Esquema de distribución de espacios en el vehículo. Ref. 13	51
Fig. 28 Propuesta de diseño del múltiple de escape H1	51
Fig. 29 Propuesta de diseño del múltiple de escape H2.....	52
Fig. 30 Propuesta de diseño del múltiple de escape R1	52
Fig. 31 Propuesta de diseño del múltiple de escape R2.....	52
Fig. 32 Unión de dos tubos de escape. Ref. 15.....	53
Fig. 33 Referencia de posicionamiento de la brida del motor	60
Fig. 34 Construcción de la brida del turbo en base a la figura 21	60
Fig. 35 Posicionamiento de las bridas de las válvulas de alivio.....	61
Fig. 36 Creación y manipulación de las curvas de construcción	62
Fig. 37 Ubicación de los planos de trabajo a lo largo de las curvas de construcción	63
Fig. 38 Asignación de layers para las curvas de construcción	64
Fig. 39 Copia del sketch de la sección transversal a lo largo de la curva de construcción	64
Fig. 40 Construcción del sólido de los ductos de descarga	65
Fig. 41 Unión de los sólidos que generan el ducto exterior	66
Fig. 42 Ductos definidos al aplicar <i>subtract</i>	67
Fig. 43 Comando <i>subtract</i> aplicado a los ductos	67
Fig. 44 Modelo terminado	68

Fig. 45 Corte a la sección de los ductos de descarga	68
Fig. 46 Primer modelo de múltiple de escape.....	69
Fig. 47 Segundo modelo del múltiple de escape	70
Fig. 48 Ensamble general vista 1	71
Fig. 49 Ensamble general vista 2	71
Fig. 50 Ensamble general vista 3	71
Fig. 51 Modelo final	72
Fig. 52 Ensamble con turbo y las 2 válvulas de alivio vista 1	72
Fig. 53 Ensamble con turbo y las 2 válvulas de alivio vista 2	73
Fig. 54 Ensamble con turbo y las 2 válvulas de alivio vista 3	73
Fig. 55 Ensamble con turbo.....	73
Fig. 56 Ensamble general en el vehículo.....	73
Fig. 57 Desplazamiento estático.....	78
Fig. 58 Esfuerzo estático	78
Fig. 59 Deformación estático	79
Fig. 60 Desplazamiento acelerado	79
Fig. 61 Esfuerzo acelerado.....	80
Fig. 62 Deformación acelerado.....	80
Fig. 63 Desplazamiento frenado	81
Fig. 64 Esfuerzo frenado	81
Fig. 65 Deformación frenado	82
Fig. 66 Desplazamiento viraje	82
Fig. 67 Deformación viraje.....	83
Fig. 68 Esfuerzo viraje	83
Fig. 69 Sección anular del tubo	84
Fig. 70 Diagrama de fuerzas	85
Fig. 71 Malla	89
Fig. 72 Modelo físico definido	89
Fig. 73 Grafica de convergencia.....	90
Fig. 74 Visualización de velocidades en los ductos 1 y 4	91
Fig. 75 Gradiente de velocidad en el ducto	91

Fig. 76 Velocidad en la intersección de los ductos	92
Fig. 77 Presión total en los ductos 1 y 4	92
Fig. 78 Presión en la sección crítica de los ductos 1 y 4.....	93
Fig. 79 Distribución de temperatura en los ductos.....	93
Fig. 80 Distribución de temperatura en los tubos 1 y 4.....	94
Fig. 81 Maquina generadora de prototipos rapidos	96
Fig. 82 Cabezal de impresión de la máquina.....	97
Fig. 83 Área de impresión.....	97
Fig. 84 Piezas retiradas del contenedor	98
Fig. 85 Sacar las piezas del contenedor.....	98
Fig. 86 Pegado de piezas con cianocrilato	98
Fig. 87 Limpieza de piezas	98
Fig. 88 Aplicación de cianocrilato en la superficie del modelo	98
Fig. 89 Modelo terminado vista inferior.....	99
Fig. 90 Modelo terminado vista lateral	99
Fig. 91 Modelo terminado vista superior.....	99
Fig. 92 Corte con pantógrafo	100
Fig. 93 Bridas cortadas.....	100
Fig. 94 Construcción del escantillón	101
Fig. 95 Escantillón construido.....	101
Fig. 96 Doblado de los tubos a partir de alambres curvados.....	102
Fig. 97 Tubos doblados	102
Fig. 98 Ajuste de los tubos doblados en el escantillón	103
Fig. 99 Soldado de tubos primera parte.....	103
Fig. 100 Soldado de tubos segunda parte.....	104
Fig. 101 Ajuste de los tubos en los puertos de las bridas.....	104
Fig. 102 Sellado de los puertos mediante soldadura	105
Fig. 103 Rectificación de las bridas	105
Fig. 104 Prueba de sellado.....	105
Fig. 105 Múltiple de metal.....	106
Fig. 106 Comparación del prototipo rapido y el múltiple de metal	106

Fig. 107 Prototipo rápido, múltiple para turbo y múltiple original	106
Fig. 109 Modelo del motor Ecotec 2.2L	109
Fig. 108 Motor con múltiple	110
Fig. 110 Motor con múltiple y valvulas de alivio.....	110
Fig. 111 Motor con múltiple, válvulas y sus tubos de escape	110
Fig. 112 Motor con el sistema completo	111
Fig. 113 No hay interferencia con el motor	112
Fig. 114 No hay interferencia entre los tubos de escape y el motor	112
Fig. 115 No hay interferencia entre las válvulas de alivio	113
Fig. 116 Tuercas que sujetan el múltiple	113
Fig. 117 Vista lateral del ensamble.....	114
Fig. 118 Vista frontal del ensamble.....	114
Fig. 119 Vista superior del ensamble.....	115
Fig. 120 Vista general del ensamble.....	115
Fig. 121 Planos del sistema de escape	116

INTRODUCCIÓN

Justificación

La ingeniería en México ha crecido considerablemente durante los últimos años, esto ha sido, por una parte, debido a las innovaciones tecnológicas y por otra, gracias al incremento del nivel educativo de nuestras universidades al ser apoyados por programas y sociedades comprometidas con el desarrollo de la ingeniería, que a través de proyectos permiten a los alumnos ingresar en el campo laboral rápidamente debido a que los protocolos que manejan las empresas patrocinadoras son desarrollados en dichos proyectos estudiantiles.

El desarrollar un sistema de escape en un proyecto colaborativo de nivel y renombre internacional nos permite como alumnos, desarrollarnos y tener una pequeña experiencia de cómo es el trabajo en el mundo real, la forma en la que se trabaja en un entorno globalizado en el que todo el mundo participa para la conformación de un proyecto. Es esa la razón del desarrollo de este trabajo de investigación, participar en un proyecto internacional el cual elevara el renombre del Instituto Politécnico Nacional a nivel mundial; y a nosotros en calidad de estudiantes, nos permitirá incrementar nuestras habilidades para trabajar en equipo utilizando herramientas que no son aplicadas en los programas curriculares del instituto.

La necesidad de la creación de un proyecto global nace en el año 2005 apoyado por PACE (Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education), es en este año cuando los socios de PACE deciden realizar este proyecto multidisciplinario y global, con la finalidad de permitir a los estudiantes de las carreras de ingeniería de universidades de todo el mundo participar en el diseño global de un producto utilizando herramientas para el diseño e integración de los mismos en tiempo real a través de internet. Trabajando en colaboración con ingenieros de GM (General Motors) para desarrollar productos automotrices cada vez mejores.

La invitación al Instituto Politécnico Nacional para participar en el PACE Global Vehicle Project se hace extensiva en el año de 2006, en la cual se invita al Instituto con sede en la ESIME Unidad Profesional Ticomán (la cual es miembro de PACE) a participar en el desarrollo del sistema de escape, dicha invitación fue aceptada y los estudiantes comenzaron a trabajar con el proyecto.

Actualmente el IPN participa en el proyecto realizando innovaciones al mismo sistema para poder acoplarlo a un turbocompresor con sus sistemas de control, estando en constante comunicación con la Universidad de Toronto en Canadá, con la SJTU (Shanghai Jiao Tong University) de China y con la Universidad de Texas en El Paso. Si el instituto sigue participando en este proyecto, al adquirir una mayor experiencia podrá incursionar en el diseño de sistemas de mayor peso, como el diseño de los alerones, carrocería o algún sistema del tren motriz.

Al trabajar dentro de un proyecto PACE, se deben de hacer uso de las herramientas de trabajo proporcionadas por los socios, utilizaremos software de diseño de ingeniería, software de CFD, herramientas de PLM, además de aplicar nuestros conocimientos y creatividad para el análisis y diseño de sistemas, contaremos con asesoría de profesores expertos en CFD, los cuales nos orientaran para entregar un buen sistema. Esto nos permitirá desarrollarnos en un campo laboral con una tendencia a la expansión y globalización como es la industria automotriz y posteriormente contribuir al desarrollo tecnológico de nuestro país.

Cuando una universidad queda envuelta en proyectos globales, obtiene un nivel de reconocimiento de nivel mundial, por esa razón nos hemos comprometido a engrandecer el nombre del Instituto Politécnico Nacional aun más de lo que ya es, y a la par, nosotros como estudiantes a obtener un mejor nivel curricular y mejores posibilidades de incursionar en la industria, y en el futuro ser parte de la formación de los nuevos ingenieros los cuales permitirán que el mundo siga girando.

Una vez que este proyecto quede concluido, podemos hacer la aplicación en vehículos de competición que utilicen motores similares haciendo el diseño, la venta e instalación de sistemas de escape y admisión para los vehículos que cumplan las características y así incursionar en el mundo de las carreras de autos, o en cualquier tipo de industria la cual nos permitirá contribuir al desarrollo económico del país.

El realizar este documento permitirá a las nuevas generaciones de alumnos hallar información clasificada de una forma accesible para aplicaciones en el área de Ingeniería térmica, debido a que contendrá los principios básicos de funcionamiento de un sistema de escape, también servirá para dejar una memoria de cálculos para las siguientes generaciones que participen en el PACE Global Vehicle Project y de esta manera impulsar a las nuevas generaciones a desarrollarse y engrandecer el nombre del Instituto Politécnico Nacional.

Objetivo General

Desarrollo de ingeniería de un sistema de escape para un motor Ecotec¹ 2.2L con turbocompresor.

Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un acoplamiento en el sistema de escape para un turbocompresor con entrada dividida T3.
- Diseñar un múltiple de escape que soporte al sistema del turbocompresor.
- Proveer a la turbina del turbocompresor gases de combustión con suficiente energía.
- Diseñar e integrar acoplamientos para 2 válvulas de alivio.
- Diseñar tubos de escape independientes para el turbocompresor y para las válvulas de alivio.
- Manufacturar el sistema de escape completo.

Hipótesis

Si se diseña y manufactura este sistema de escape, se tendrá la facilidad de acoplar el sistema de un turbocompresor a un motor Ecotec 2.2L para un vehículo de carreras. Debido a que el sistema de escape original no tiene esta capacidad.

¹ Motor de nueva generación de cuatro cilindros producido por General Motors, el cual tiene un desplazamiento de 2.0 a 2.4 litros.

Marco Teórico

La ecuación de continuidad

La conservación de la masa de fluido a través de dos secciones (sean éstas S_1 y S_2) de un conducto (tubería) o tubo de corriente establece que: la masa que entra es igual a la masa que sale.

Corolario 1: no hay flujo a través de la superficie del tubo de corriente.

Corolario 2: solo hay tubo de corriente si V es diferente de 0.

Principio de Bernoulli

Principio físico que implica la disminución de la presión de un fluido (líquido o gas) en movimiento cuando aumenta su velocidad. El teorema afirma que la energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo. Puede demostrarse que, como consecuencia de ello, el aumento de velocidad del fluido debe verse compensado por una disminución de su presión.

El teorema se aplica al flujo sobre superficies, como las alas de un avión o las hélices de un barco. Las alas están diseñadas para que obliguen al aire a fluir con mayor velocidad sobre la superficie superior que sobre la inferior, por lo que la presión sobre esta última es mayor que sobre la superior. Esta diferencia de presión proporciona la fuerza de sustentación que mantiene al avión en vuelo. Una hélice también es un plano aerodinámico, es decir, tiene forma de ala. En este caso, la diferencia de presión que se produce al girar la hélice proporciona el empuje que impulsa al barco. El teorema de Bernoulli también se emplea en las toberas, donde se acelera el flujo reduciendo el diámetro del tubo, con la consiguiente caída de presión. Asimismo se aplica en los rotámetros de orificio, también llamados venturi, que miden la diferencia de presión entre el fluido a baja velocidad que pasa por un tubo de entrada y el fluido a alta velocidad que pasa por un orificio de menor diámetro, con lo que se determina la velocidad de flujo y, por tanto, el caudal.

Perdidas continuas

Las pérdidas por rozamiento son función de la rugosidad del conducto, de la viscosidad del fluido, del régimen de funcionamiento (flujo laminar o flujo turbulento) y del caudal circulante, es decir de la velocidad (a más velocidad, más pérdidas).

Cuando el flujo es turbulento (número de Reynolds superior a 8.000), lo que ocurre en la práctica totalidad de los casos, existen varias fórmulas, tanto teóricas (Ecuación de Darcy-Weisbach), como experimentales (ecuación de Hazen-Williams, ecuación de Manning, etc.), que relacionan la pendiente de la línea de energía con la velocidad de circulación del fluido.

Perdidas localizadas

En el caso de que entre las dos secciones de aplicación del Principio de Bernoulli² existan puntos en los que la línea de energía sufra pérdidas localizadas (salidas de depósito, codos, cambios bruscos de diámetro, válvulas, etc.), las correspondientes pérdidas de altura se suman a las correspondientes por rozamiento. En general, todas las pérdidas localizadas son solamente función de la velocidad, viniendo ajustadas mediante expresiones experimentales.

Relación de presiones

La relación de presiones es la presión total absoluta producida por el turbo dividida entre la presión atmosférica. Presión absoluta significa cero absoluto, de esta manera, la presión atmosférica es 14.7 absoluto. 2 psi de incremento se convierten en 16.7 absoluto, 5 psi de incremento son 19.7 absoluto, y así. Entonces, la presión absoluta es lo que el medidor lee más 14.7. Por lo tanto, la

² **Daniel Bernoulli** (8 de febrero de 1700 - 17 de marzo de 1782) fue un matemático holandés/suizo. Destacó no sólo en matemáticas puras, sino también en las aplicadas. Hizo importantes contribuciones en hidrodinámica y elasticidad.

relación de presiones se convierte en un reflejo del número de atmosferas de presión generadas.

$$\text{relacion_de_presiones} = \frac{14.7 + \text{incremento}}{14.7}$$

Por ejemplo:

Para 5psi de incremento:

$$RP = \frac{14.7 + 5}{14.7} = 1.34$$

En este ejemplo, aproximadamente 34% más de aire va a entrar al motor de lo que hubiera podido consumir por sí mismo.

Para 12 psi de incremento:

$$RP = \frac{14.7 + 12}{14.7} = 1.82$$

Aquí, aproximadamente 82% más de masa de aire va a entrar al sistema.

La presión se mide también en bares, diminutivo de barométrica, una relación de presiones de 1.82 equivale a una presión de admisión de 1.82 bares.

Flujo de aire

El índice de flujo de aire en un motor es generalmente referido como pies cúbicos por minuto (cfm, por sus siglas en ingles) de aire a la presión atmosférica estándar. El técnicamente correcto pero menos usado término es libras de aire por minuto.

Para calcular el índice de flujo de aire de un motor sin un turbo:

$$\text{flujo_máscico_de_aire} = \frac{\text{cid} \times \text{rpm} \times 0.5 \times E_v}{1728}$$

Aquí, el índice de flujo esta en cfm y el desplazamiento en pulgadas cubicas. El 0.5 se debe al hecho de que un motor de cuatro tiempos llena sus cilindros solo una mitad de las revoluciones. E_v es la eficiencia volumétrica. El 1728 convierte

pulgadas cúbicas a pies cúbicos. Para convertir cfm a libras de aire por minuto se multiplica cfm por la densidad del aire a la altitud de trabajo y por la gravedad.

Método del elemento finito

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados *elementos finitos*. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados *nodos*. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama *mall*.

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos. Además el método es fácilmente adaptable a problemas de difusión del calor, de mecánica de fluidos

para calcular campos de velocidades y presiones o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

El método del elemento finito consiste en un modelo informático del material o diseño que es tensado y analizado para conseguir resultados específicos. Es usado en el diseño de nuevos productos, y en la mejora de los actuales.

Hay generalmente dos tipos de análisis que son usados en la industria: modelos en 2D y en 3D. Mientras los modelos en 2D conservan la simplicidad y permiten que el análisis se realice en una computadora normal, tiende a dar resultados menos precisos. El modelado en 3D, sin embargo, producen resultados más precisos mientras sacrifica la habilidad para funcionar de manera efectiva en cualquier computadora, menos en las más rápidas. Con cada uno de estos esquemas modelados, el programador puede insertar numerosos algoritmos ó funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal. Los sistemas lineales son menos complejos y normalmente no tienen en cuenta deformaciones plásticas. Los sistemas no lineales toman en cuenta las deformaciones plásticas, y algunos incluso son capaces de testear el material hasta la fractura.

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. Para ello trabaja discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras), que se conectan entre sí mediante “nodos”. La solución ahora es sólo aproximada en función de los resultados obtenidos para los nodos. El MEF parte del cálculo matricial en el planteamiento del equilibrio en los nodos mediante un sistema de ecuaciones resultado de la contribución de los elementos.

El MEF usa un complejo sistema de puntos llamados nodos que hacen una red llamada malla. Esta malla está programada para contener el material y las propiedades de la estructura que definen como esta reaccionará ante ciertas condiciones de carga. A los nodos se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de estrés anticipado en un área. Las regiones que recibirán gran cantidad de estrés tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente testeados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevado estrés. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

Soldadura MIG

El sistema MIG fue introducido a fines del año 1940. El proceso es definido por la AWS como un proceso de soldadura al arco, donde la fusión se produce por calentamiento con un arco entre un electrodo de metal de aporte continuo y la pieza, donde la protección del arco se obtiene de un gas suministrado en forma externa, el cual protege el metal líquido de la contaminación atmosférica y ayuda a estabilizar el arco.

La figura 1 indica esquemáticamente una soldadura por sistema MIG:

En el sistema MIG, un sistema de alimentación impulsa en forma automática y a velocidad predeterminada el alambre-electrodo hacia el trabajo o baño de fusión, mientras la pistola de soldadura se posiciona a un ángulo adecuado y se

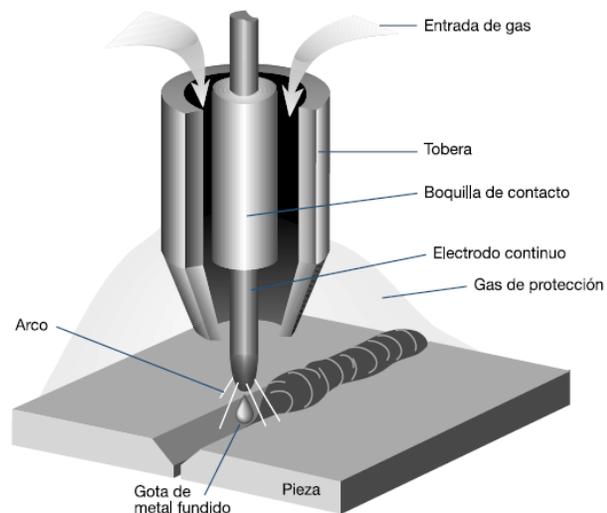


Fig. 1 Soldadura MIG

mantiene una distancia tobera-pieza, generalmente de 10 mm.

El sistema MIG posee cualidades importantes al soldar aceros, entre las que sobresalen:

1. El arco siempre es visible para el operador.
2. La pistola y los cables de soldadura son ligeros, haciendo muy fácil su manipulación.
3. Es uno de los más versátiles entre todos los sistemas de soldadura.
4. Rapidez de deposición.
5. Alto rendimiento.
6. Posibilidad de automatización.

El sistema MIG requiere del siguiente equipo:

1. Una máquina soldadora.
2. Un alimentador que controla el avance del alambre a la velocidad requerida.
3. Una pistola de soldar para dirigir directamente el alambre al área de soldadura.
4. Un gas protector, para evitar la contaminación del baño de soldadura.
5. Un carrete de alambre de tipo y diámetro específico.

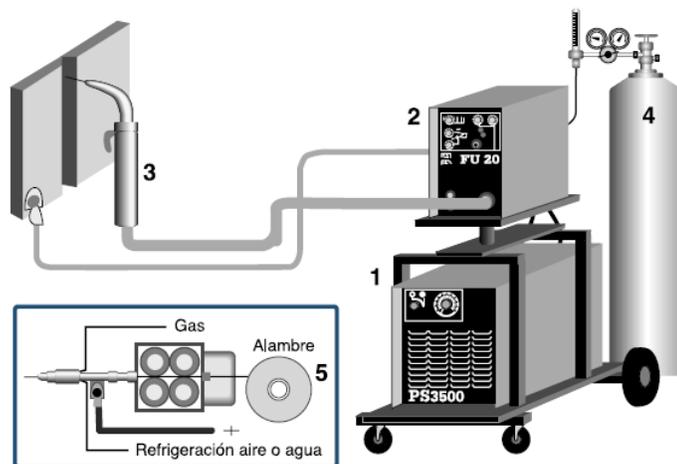


Fig. 2 Diagrama del equipo MIG

Resumen del proceso

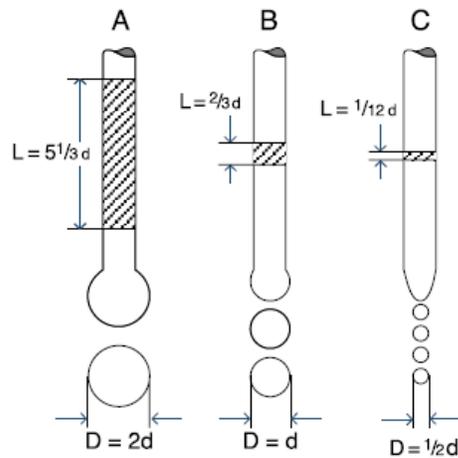
El sistema MIG es un proceso de soldadura por arco eléctrico, en el cual un alambre es automática y continuamente alimentado hacia la zona de soldadura a

una velocidad constante y controlada. El área de soldadura y arco están debidamente protegidas por una atmósfera gaseosa suministrada externamente, que evita la contaminación.

El voltaje, amperaje y tipo de gas de protección, determinan la manera en la cual se transfiere el metal desde el alambre-electrodo al baño de soldadura. Para comprender mejor la naturaleza de estas formas de transferencia en el sistema MIG, a continuación las detallaremos.

Transferencia metálica

En soldadura MIG, las gotas de metal fundido son transferidas a través del arco, desde un alambre-electrodo alimentado continuamente, a la zona de soldadura.



Para un diámetro dado de electrodo (d), con una protección gaseosa, la cantidad de corriente determina el tamaño de las gotas (D) y el número de ellas que son separadas desde el electrodo por unidad de tiempo:

Zona A: A valores bajos de amperaje, las gotas crecen a un diámetro que es varias veces el diámetro del electrodo antes que éstas se separen. La velocidad de transferencia a bajos amperajes es sólo de varias gotas por segundo.

Zona B: A valores intermedios de amperaje, el tamaño de las gotas separadas decrece rápidamente a un tamaño que es igual o menor que el diámetro del electrodo, y la velocidad de separación aumenta a varios cientos por segundo.

Zona C: A valores altos de amperaje, la velocidad de separación aumenta a medida que se incrementa la corriente, las gotas son bastante pequeñas.

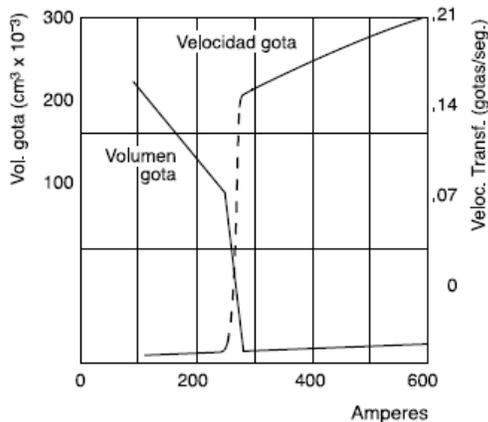


Fig. 3 Tipos de zonas

Existen tres formas de transferencia metálica:

1. Transferencia spray

El metal es transportado a alta velocidad en partículas muy finas a través del arco. La fuerza electromagnética es bastante fuerte para expulsar las gotas desde la punta del electrodo en forma lineal con el eje del electrodo, sin importar la dirección a la cual el electrodo está apuntando. Se tiene transferencia spray al soldar, con argón, acero inoxidable y metales no ferrosos como el aluminio.

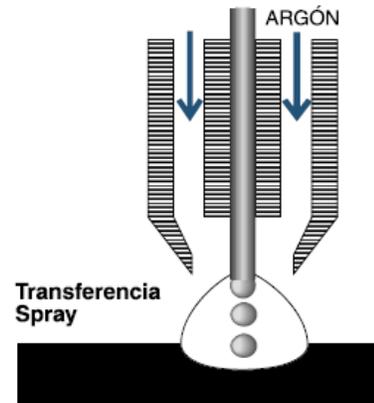


Fig. 4 Transferencia Spray

2. Transferencia globular

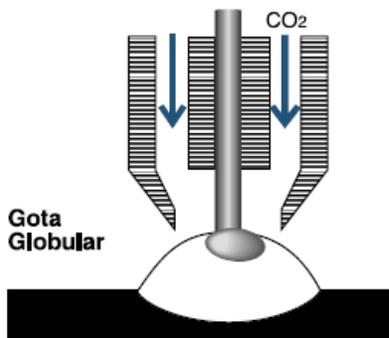


Fig. 5 Transferencia Globular

El metal se transfiere en gotas de gran tamaño. La separación de las gotas ocurre cuando el peso de éstas excede la tensión superficial que tiende a sujetarlas en la punta del electrodo. La fuerza electromagnética que actuaría en una dirección para separar la gota, es pequeña en relación a la fuerza de gravedad en el rango de transferencia globular (sobre 250 Amp). La transferencia globular se utiliza para soldar acero dulce en espesores mayores a 13 mm, en que se requiere gran penetración.

3. Transferencia por corto circuito

El metal no es transferido libremente a través del arco, sino que se deposita, cuando la punta del electrodo toca el metal base. Los cortos circuitos producidos por el contacto del electrodo con el baño fundido, ocurren con mucha regularidad, hasta 200 o más veces por segundo. El resultado final es un arco muy estable usando baja energía

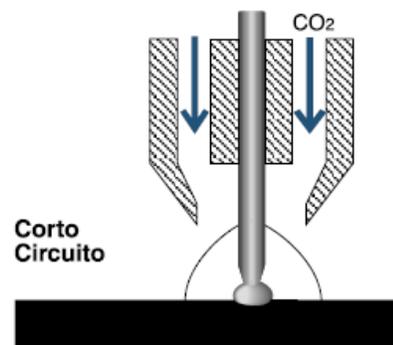


Fig. 6 Transferencia por corto circuito

(inferior a 250 Amp) y bajo calor. El bajo calor reduce al mínimo la distorsión,

deformación del metal y otros efectos metalúrgicos perjudiciales. Esta transferencia metálica se obtiene en presencia de dióxido de carbono (CO₂) o indurmig (Ar-CO₂).

La figura 7 ilustra, por medio de trazos oscilográficos, la secuencia del voltaje y de la corriente durante un ciclo típico de soldadura por corto circuito.

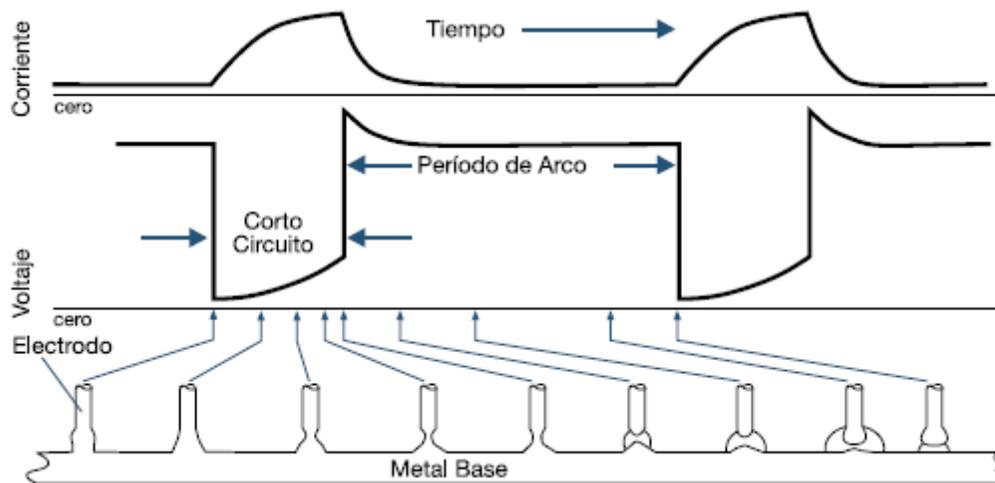


Fig. 7 Secuencia de voltaje y corriente

Electrodos y protección gaseosa

El propósito principal del gas de protección es desplazar el aire en la zona de soldadura y así evitar su contaminación por nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Estas impurezas afectan las propiedades del metal de soldadura.

Gases protectores

Gases inertes y activos se emplean en el sistema MIG. Cuando se desea soldar metales no ferrosos, se emplean gases inertes debido a que ellos no reaccionan con los metales. Los gases inertes usados en sistema MIG son: argón, helio y mezclas de argón-helio.

Sin embargo, en la soldadura de metales ferrosos se pueden emplear gases inertes o activos. Gases activos como: Dióxido de carbono, mezclas de dióxido de carbono, o gases protectores que contienen algún porcentaje de oxígeno. Estos gases no son químicamente inertes y pueden formar compuestos con los metales.

Hay varios factores que son necesarios considerar al determinar el tipo de gas de protección a emplear. Estos son:

1. Tipo de metal base.
2. Características del arco y tipo de transferencia metálica.
3. Velocidad de soldadura.
4. Tendencia a provocar socavaciones.
5. Penetración, ancho y forma del depósito de soldadura.
6. Disponibilidad.
7. Costo del gas.
8. Requerimientos de propiedades mecánicas.

Máquinas soldadoras

En este proceso la máquina de soldar más empleada es aquella del tipo de corriente continua y de voltaje constante, o sea, una máquina que mantiene voltaje constante en el arco, sin que lo afecten variaciones de corriente en el arco. Es importante señalar, que este tipo de máquina de soldar puede ser usada sólo para soldadura semiautomática. La curva característica de este tipo de máquina se indica en la figura.

Cuando se usa una máquina de soldar de tipo voltaje constante, existen pocos

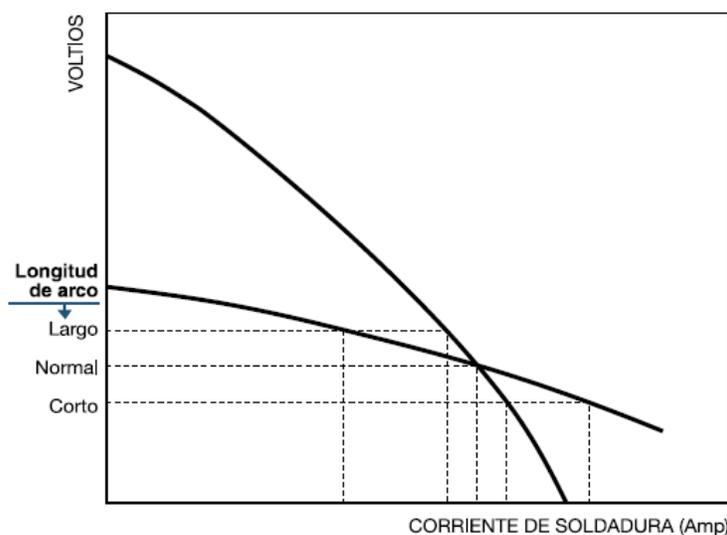


Fig. 8 Grafica voltaje vs. Corriente

cambios en el resultado del voltaje del arco, comparado con el cambio relativamente grande en la corriente de soldadura. Por ejemplo, como se puede ver en la figura 8, cuando la longitud del arco se acorta, aumenta notablemente la corriente de soldadura.

Esto produce un aumento

del promedio de consumo, equilibrando la longitud del arco al nivel deseado.

El principio está basado en el hecho de que la máquina de soldar de voltaje constante cambia la salida de corriente, para poder obtener la caída de tensión apropiada en el secundario del sistema de soldadura.

En este sistema, el ajuste de la longitud del arco es controlado al fijarse la magnitud del voltaje en la máquina de soldar, mientras que la corriente de soldar está controlada por medio de la velocidad en el alimentador de alambre.

Sistema de clasificación del alambre para proceso MIG

La AWS clasifica los alambres sólidos, usando una serie de números y letras. Para aceros al carbono, la clasificación está basada en las propiedades mecánicas del depósito de soldadura y su composición química

Una típica clasificación de electrodo MIG para soldadura de acero es:

ER-70S-6 (Sistema inglés)

ER-48S-6 (Sistema métrico)

1. La letra E indica electrodo
2. La letra R indica varilla
3. Los dos (o tres) dígitos siguientes indican la resistencia a la tracción en miles de libras/pulg² o decenas de mega pascales según se use el sistema de unidades inglés o métrico respectivamente.
4. La letra S indica que el tipo de alambre es sólido.
5. El dígito, o letra y dígito indica la composición química especial del electrodo.

Así, ER-70S-6 indica un electrodo-varilla, sólido, con una resistencia mínima a la tracción de 70.000 lb/pulg² y ER-48S-6 un electrodo-varilla, sólido, con una resistencia mínima a la tracción de 480 MPa.

Alcance

En el motor original solo se cuenta con un sistema de escape convencional, el cual tiene un diseño simple, es muy pesado y además no permite el fácil acoplamiento de un turbocompresor.

Dada esta situación, el propósito de este proyecto es obtener un sistema hecho con materiales más ligeros, resistentes, que cumpla con los requerimientos del turbocompresor y que se pueda acoplar al sistema de turboalimentación y al motor Ecotec 2.2L en un vehículo de carreras, según los requerimientos previos para el mismo fin en el proyecto global.

El desarrollo de este proyecto incluye la planeación, el diseño conceptual, diseño de ingeniería, análisis, validación, diseño de manufactura y ensamble.

Metodología

- Verificar los parámetros de diseño
- Hacer un diseño conceptual del sistema
- Calcular el múltiple de escape y la tubería necesaria para el sistema de escape
- Determinar el método de manufactura
- Modelar virtualmente los componentes mediante NX4
- Determinar los tipos de materiales
- Analizar el sistema estructuralmente
- Analizar el flujo de los gases de escape a lo largo del sistema por medio de CFD
- Determinar las características físicas que conforman el sistema óptimo
- Fabricar un prototipo rápido
- Obtener los materiales
- Construir un escantillón
- Preparar los materiales
- Manufacturar los elementos del sistema de escape
- Planear el ensamble del sistema en el motor

Capitulado

En el primer capítulo se muestra una reseña de los sistemas de escape en los motores automotrices, la descripción del motor Ecotec 2.2L, su ficha técnica y los parámetros de desempeño originales, así como las características del sistema de escape original y por último, las características del turbocompresor y las válvulas de alivio.

En el capítulo 2 se hace un diseño conceptual del sistema, así como el cálculo para determinar sus características y se realiza el modelado y ensamble del sistema utilizando el software Unigraphics NX4.

En el capítulo 3 se presenta el análisis estructural y de flujo.

En el capítulo 4 se lleva a cabo el estudio del proceso de manufactura y la manufactura de los componentes del sistema.

En el capítulo 5 se presenta el plan de ensamble del sistema de escape en el motor.

CAPITULO 1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

1.1 Sistemas de escape automotrices

Los automóviles turbocargados modernos han traído un nuevo significado al término “sistema de escape de flujo libre” con su connotación de baja contrapresión. Los sistemas de escape modernos, invariablemente tienen un convertidor catalítico implicando alta contrapresión.

Los silenciadores no son construidos para mejorar el flujo de gases hacia afuera de la cámara de combustión. Esto significa que el motor tiene que forzar la salida de los gases de escape hacia el exterior por la tubería del sistema de escape, con el resultado de que la cámara del cilindro mantiene algo de gases en su interior cuando ingresa otra carga de mezcla combustible.

Los gases residuales que ya no son útiles para quemar nuevamente, toman espacio que de otra manera se puede ocupar con mezcla de combustible y aire para producir la explosión de la cual se obtiene potencia. Esa situación empeora a medida que el motor aumenta sus revoluciones, entonces la contrapresión en el sistema de escape hace que el motor tenga que bombear gases a través de un sistema restrictivo.

El regreso de los gases de escape hacia la cámara de combustión durante el traslape de válvulas se llama *contrapresión* o *regresión*.

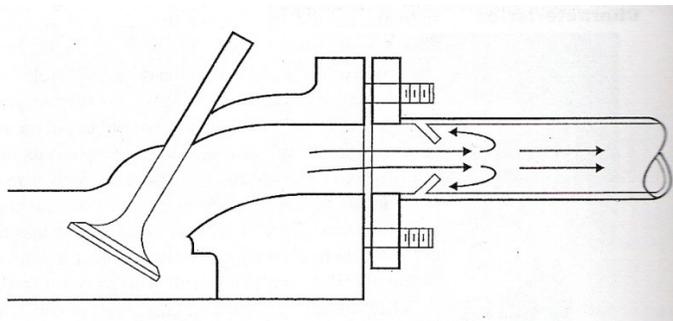


Fig. 9
Barrera aerodinámica que reduce la contrapresión.
Ref. 1

Crear una barrera aerodinámica que reduzca el regreso del flujo pero que no impida la salida del mismo es una buena opción. Mientras menos contrapresión mejor. Es común ver contrapresión que crece a 5psi en algunos motores al incrementar la potencia. Al final de la tubería del escape, el monto de gases que permanece dentro de la cámara de combustión queda remanente a esa presión. A continuación, la válvula de admisión se abre y esta presión de gases de

escape remanente alcanza la válvula de admisión en el trayecto de entrada. Esto presiona hacia atrás la carga fresca de la mezcla de combustible. Cuando el pistón se ha desplazado hacia abajo lo suficiente para derivar dentro la carga de la admisión, se tendrá una mezcla más diluida que reduce mucho la eficiencia del motor.

Hay mucho por ganar si se asegura que los gases de escape sean efectivamente removidos de la cámara. Los tubos de escape con diseño de curvas suaves, los silenciadores de flujo relativamente libre, los headers y los tubos balanceados ayudan a conseguir más eficiencia del sistema de escape y así un gran desempeño.

Un sistema bien diseñado puede también drenar los gases hacia afuera de la cámara de combustión aprovechando el momento en que los gases viajan hacia el exterior succionando los gases residuales. Los gases se desplazan hacia la salida por la tubería creando un área de baja presión por detrás.

Esto no solamente purga la cámara de combustión, también drena más mezcla dentro de la misma durante el período de apertura de la válvula. Así, en lugar de tener alta presión de gases de escape saltando en el trayecto de la admisión, se tiene en su lugar un efecto de aspiración dentro de la cámara de combustión el cual tira de la carga fresca hacia la cámara siempre que la válvula abre.

Retención de calor

Claramente el desempeño de la turbina es en parte determinado por la temperatura de los gases de escape. Es razonable hacer un esfuerzo por llevar los gases de escape de la cámara de combustión a la turbina con la menor pérdida de calor posible. La conductividad térmica de un material es la medida de la habilidad del material de conducir calor. Ya que el objetivo aquí es mantener el calor dentro de múltiple, es razonable tratar de usar un material con la menor habilidad de transferir calor.

Características térmicas

El espesor de pared de un material en particular va a influenciar en gran medida la transferencia de calor, por lo que, mientras más delgado sea el material el calor va viajar más rápido a través de él. La transferencia de calor es proporcional a la superficie. Por lo tanto es considerable mantener el área expuesta del múltiple al mínimo posible. Claramente, mientras menos área, menos pérdida de calor. Reducir la cantidad de aire del ambiente fluyendo alrededor del múltiple de escape y del turbo reducirá posteriormente la pérdida de calor del sistema.

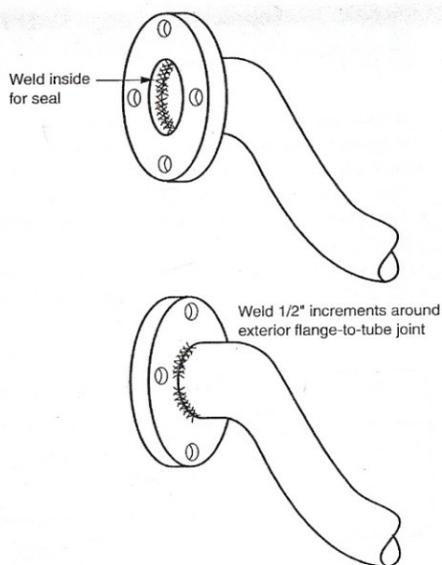


Fig. 10 Soldadura entre la brida de salida de la turbina y el tubo de escape. Ref. 1

Unión del turbo al tubo de escape

Esta parte del sistema de escape está sujeta a temperaturas de hasta 1500°F. Esta es tal vez la sección más forzada del sistema. Por lo tanto, la fuerza es de principal importancia. La fuerza empieza con el espesor de la brida de la salida de la turbina. Esta brida puede ser tan gruesa como 1/2 pulgada.

Posición del sensor de oxígeno

El sensor de oxígeno idealmente va tan cerca de la cámara de combustión como la temperatura lo permita. En la mayoría de las circunstancias donde hay un turbo, el sensor de oxígeno, debería estar inmediatamente después del turbo.

Un sistema de escape es la acumulación de características optimizadas y cuidadosamente pensadas. El objetivo que se debe alcanzar correlacionando estas características de diseño es la creación de un tubo de escape con la menor contrapresión posible, nivel de ruido aceptable y de flujo libre.

El múltiple de escape juega un importante papel en todos los aspectos de desempeño del sistema del turbocompresor. El múltiple del turbo tiene muchas y

variadas tareas que desempeñar. Las responsabilidades directas incluyen soportar el turbo, guiar los gases de escape a la turbina, manteniendo la presión de los pulsos de gases moviéndose intactos a lo largo de los tubos a un ritmo constante y tratando de no dejar que el calor se escape por las paredes del múltiple. La aplicación, ya sea para competición o de alto desempeño para calle, va a influenciar la selección del material, el estilo de diseño y el método de manufactura. Cualquier sistema de turbocompresor de máximo desempeño va a ser configurado en relación a un múltiple de estilo tubular.

En general, existe mucha libertad para escoger el estilo de múltiple cuando este va a ser fabricado. Estas selecciones van desde el simple estilo ramificado al estilo de tubos múltiples, individuales y de la misma longitud. Se han hecho una gran cantidad de investigaciones acerca de los beneficios en el desempeño de diferentes tipos de múltiples. La mayoría de estas indican que el mejor diseño es el de tubos múltiples e individuales. El proceso de fundición se usa para diseños más simples debido en gran medida a las complicaciones y al costo de los diseños. Estos diseños generalmente adoptan el estilo ramificado, los cuales son buenos para la producción pero no para el máximo desempeño. Es necesario entender que un múltiple de fundición puede dar un buen desempeño pero no es un componente para autos de carreras.

Un múltiple de escape es un ejercicio de diseño complicado, involucrando muchos parámetros. El parámetro más simple e importante es el material. Que el interior sea currentilíneo es importante para evitar pérdidas por fricción. Otra característica de diseño crítica es la velocidad de flujo. Los gases de escape no deben ser forzados a acelerar y desacelerar porque perderían energía considerable de gran utilidad para la turbina. Un flujo suave y de velocidad constante es ideal. Mientras más calor sea retenido dentro del múltiple, menor será la porción de retraso térmico del retraso total del turbo. Un diseño que permita que los pulsos de gases lleguen a la turbina a intervalos regularmente espaciados es ideal pero difícil de lograr.

1.2 Características del motor Ecotec 2.2L

Al motor Ecotec 2.2L de aluminio de bajo peso con árbol de levas a la cabeza lo caracteriza un diseño modular, dando flexibilidad a varias tecnologías futuras como turboalimentación, válvulas de tiempo variable e inyección de gasolina directa. El poco mantenimiento es otra característica: la única rutina de servicio es el cambio de aceite y filtro.

Aunque cada motor Ecotec cuenta con diferencias de hardware y características de

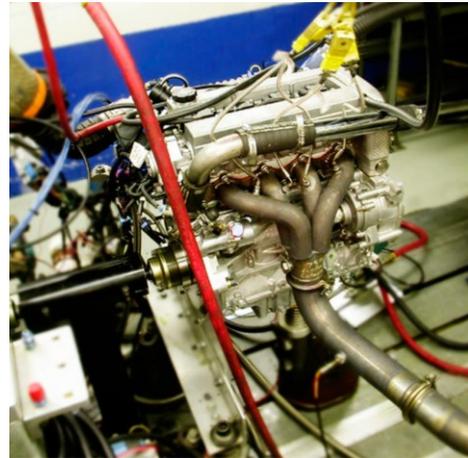


Fig. 11 Sistema de escape del motor Ecotec 2.0 supercargado. Ref. 6.

desempeño distintas, todos comparten la sólida arquitectura base de la familia Ecotec y la construcción en aluminio con:

- Doble árbol de levas sobre cabeza (DOHC) y cuatro válvulas por cilindro
- Flechas de balance de contragiro dobles
- Tren de válvulas de seguidores de rodillo de baja fricción con ajuste hidráulico
- Cadenas de sincronización de levas libres de mantenimiento
- Dimensiones extremadamente compactas y de poco peso
- Montaje directo de todos los accesorios en la estructura del motor para eliminar las fuentes comunes de ruido, vibración y dureza
- El acoplamiento en todo el diámetro de la transmisión es más rígido que en la mayoría de los sistemas de tren motriz de 4 cilindros para obtener menos ruido y vibración.
- Sistema de Vida del Lubricante GM para brindar una frecuencia óptima de cambio de aceite
- No se requiere mantenimiento además de los cambios de aceite y filtro

- El catalizador se localiza cerca del múltiple de escape para acelerar el apagado del catalizador y reducir las emisiones de hidrocarburos
- Innovadora carcasa del filtro de aceite que elimina la necesidad de colocarse bajo el vehículo para el cambio de aceite. El diseño elimina también los filtros desechables tipo lata que retenían el aceite usado.



Fig. 12 GM Cobalt con motor Ecotec. Ref. 7

El Ecotec 2.0 L en el coupé Cobalt SS supercargado ofrece 205 caballos de fuerza (152 kw). El desarrollo de este motor Ecotec de alto rendimiento incluyó a GM Racing, a Operaciones de Vehículos de Alto Rendimiento GM (HPVO) y Saab.

Con el fin de alcanzar los objetivos de durabilidad, el Ecotec 2.0 L SC recibió componentes mejorados en áreas de estrés crítico. La experiencia en las competiciones Championship Drag Racing, de la NHRA, ayudó a los ingenieros a identificar en qué partes el Ecotec resultaría más beneficiado por los componentes de trabajo pesado.

Las carreras de arrancones FWD reflejan el mercado de autos actual. Generando hasta 1,000 caballos de fuerza con solo cuatro cilindros, las versiones de carreras del Cavalier y Sunfire propulsados por un Ecotec los hacen unos de los autos de tracción delantera que aceleran más rápido. Remarcablemente, muchos de los componentes usados en estos motores son de producción en serie. Estos esfuerzos hechos en las carreras muestran el potencial del Ecotec en el mercado de autos compactos deportivos.

El 17 de octubre de 2003, el Saturn ION Red Line figuró en el libro de records de las planicies de sal en Boneville con una nueva marca de 212.684 mph en la clase G/Blown Fuel Altered, batiendo el record anterior por casi 30 mph. El motor fue un Ecotec 2.0 modificado con un



Fig. 13 Cobalt de alto desempeño que corrió en las planicies de sal en Boneville. Ref. 8.

turbocompresor en lugar del supercargador que es generalmente montado en la versión de 2 litros. En 2004, un Ecotec 2.0 modificado y turbocargado similar propulso a un Cobalt SS en Boneville a una velocidad máxima de 243.127 mph (debido a las reglas de la SCTA, esta velocidad no fue elegida para el libro de records). Es el fuerte y modular diseño del original Ecotec 2.2 lo que hace al 2.0 turbocargado y modificado tan extraordinariamente exitoso.

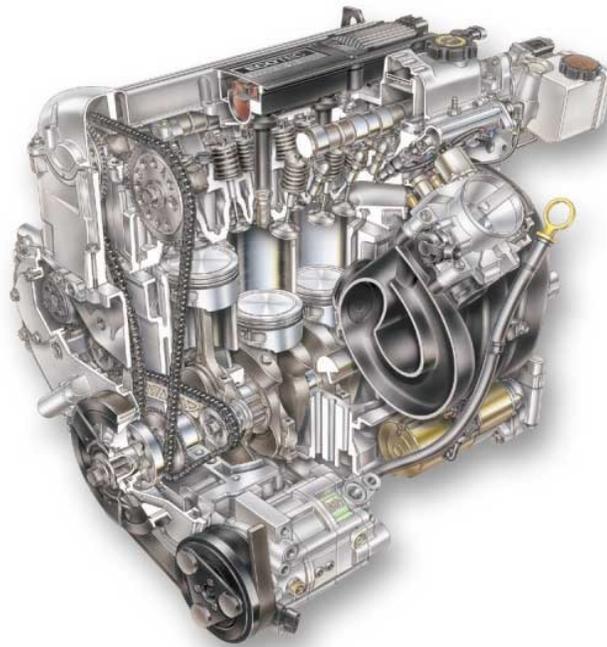


Fig. 14 Corte del motor Ecotec 2.2L. Ref. 8.

FICHA TECNICA DEL MOTOR ECOTEC 2.2 L

2008 Ecotec 2.2L I4 (L61)	
Type:	Ecotec 2.2L I4
Displacement:	2189cc (134 ci)
Engine Orientation: L (longitudinal) T (transverse)	T
Compression ratio:	10.0:1
Valve configuration:	dual overhead camshafts
Valves per cylinder:	4
Assembly site:	Spring Hill, Tenn; Tonawanda, NY; Kaiserslautern, Germany
Valve lifters:	hydraulic roller finger follower
Firing order:	1 - 3 - 4 - 2
Bore x stroke:	86.00 x 94.60mm
Fuel system:	sequential fuel injection
Fuel Type:	Regular Unleaded
Applications:	Horsepower: hp (kW)
Chevy Cobalt	148 hp (110 kW) @ 5600 rpm SAE CERTIFIED
Pontiac G5	148 hp (110 kW) @ 5600 rpm SAE CERTIFIED
Chevy HHR	149 hp (111 kW) @ 5600 rpm SAE CERTIFIED
Chevy Malibu	145 hp (108 kW) @ 5600 rpm SAE CERTIFIED
Applications:	Torque: lb.-ft. (Nm)
Chevy Cobalt	152 lb.-ft. (206 Nm) @ 4200 rpm SAE CERTIFIED
Pontiac G5	152 lb.-ft. (206 Nm) @ 4200 rpm SAE CERTIFIED
Chevy HHR	152 lb.-ft. (206 Nm) @ 4200 rpm SAE CERTIFIED
Chevy Malibu	152 lb.-ft. (206 Nm) @ 4200 rpm SAE CERTIFIED
Fuel shut off:	6750 rpm
Emissions controls:	evaporative system catalytic converter positive crankcase ventilation
MATERIALS	
Block:	cast aluminum
Cylinder head:	cast aluminum
Intake manifold:	composite
Exhaust manifold:	high silicon molybdenum, cast nodular iron
Main bearing caps:	aluminum bedplate
Crankshaft:	cast nodular iron
Camshaft:	cast nodular iron
Connecting rods:	forged powder metal
Additional features:	extended life spark plugs extended life coolant electronic throttle control (Malibu, Cobalt, HHR) unitized exhaust manifold/catalyst (G6) dual converter system

Tabla 1 Ficha técnica del motor Ecotec 2.2L. Ref. 10

1.3 Características del sistema de escape original

El sistema, no es útil para acoplarle el sistema de un turbocompresor, ya que sólo cuenta con el múltiple de escape original, que no tiene una brida diseñada para acoplarle un turbocompresor. Además del múltiple, el sistema cuenta con el tubo colector, catalizador y tubo de escape.



Fig. 16 Múltiple original del Ecotec hecho de fundición de acero. Ref.9

El múltiple de escape del motor es de fundición nodular de acero y molibdeno, lo cual hace que este componente sea pesado y limitado en desempeño, ya que el proceso de fundición solo permite manufacturar diseños simples y con espesores de pared relativamente gruesos. Por ende, con éste proceso no es posible manufacturar un múltiple diseñado especialmente para alto desempeño. Los diseños fabricados por medio de fundición son útiles para la producción en serie y tal vez algunos sean eficientes pero no son óptimos para competencias de autos.

Es importante también mencionar que para el propósito de este trabajo no se utilizará ningún catalizador o silenciador. Esto es debido a que este sistema de escape va a ser diseñado para vehículos de competencia, ámbito donde no es de gran importancia el ruido o el cuidado de los gases de escape cuando estos ya han desalojado el sistema por completo.

El múltiple de escape del motor es de fundición nodular de acero y molibdeno, lo cual hace que este componente sea pesado y limitado en desempeño, ya que el proceso de fundición solo permite manufacturar diseños simples y con espesores de pared relativamente gruesos. Por ende, con éste proceso no es posible manufacturar un múltiple diseñado



Fig. 15 Tubos de escape originales del Ecotec. Ref.9

1.4 Características del turbocompresor

Este turbocompresor es de la familia GT37 de la marca Garrett³. El modelo del turbocompresor es el GT3782, el cual tiene para aplicación un rango de potencia de 350 a 550 hp y un rango de desplazamiento de 2.0 a 4.0 L.

Algunas de sus características son:

- Sistema de enfriamiento de rodamientos por aceite
- Sistema de rodamientos GT de alta capacidad de carga
- Compresor de alto desempeño BCI-18
- Turbina UHP (ultra alta potencia)
- Brida de salida de la turbina de 4 tornillos
- Entrada de la turbina tipo T3
- Eficiencia máxima de la turbina de 68%
- Relación de presiones máxima de 3.5 psi

Tabla 2 Especificaciones del turbocompresor GT3782. Ref. 11.

GT3782		COMPRESSOR				TURBINE			
Turbo	CHRA	Wh Dia		Trim A/R		Wh Dia	Trim	A/R	Type
		Ind	Exd						
452159-3	436085-5	59.1mm	82.0mm	52	0.54	72.5mm	84	1.12	Free Float

Entrada de la turbina dividida T3

Este tipo de entrada permite a los pulsos de gases de escape ser agrupados (o separados) por cilindro todo el camino a la turbina. El propósito de hacer esto es mantener el paquete individual de energía intacto y sin perturbaciones por otros paquetes todo el camino a la turbina. Esto le puede dar a la turbina un poco más de impulso para moverse. Esto es más efectivo para motores con menos cilindros, y por lo tanto menos pulsos por ciclo del motor.

³ Garrett, empresa dedicada a la fabricación turbocompresores, válvulas de alivio, interenfriadores, etc.

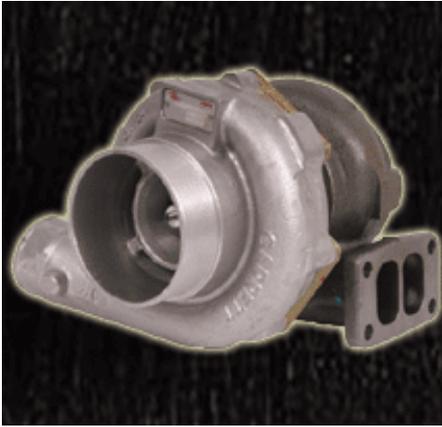


Fig. 17 Vista del compresor del GT3782. Ref. 11.



Fig. 18 Vista de la turbina del GT3782. Ref. 11.

MAPA DE LA TURBINA

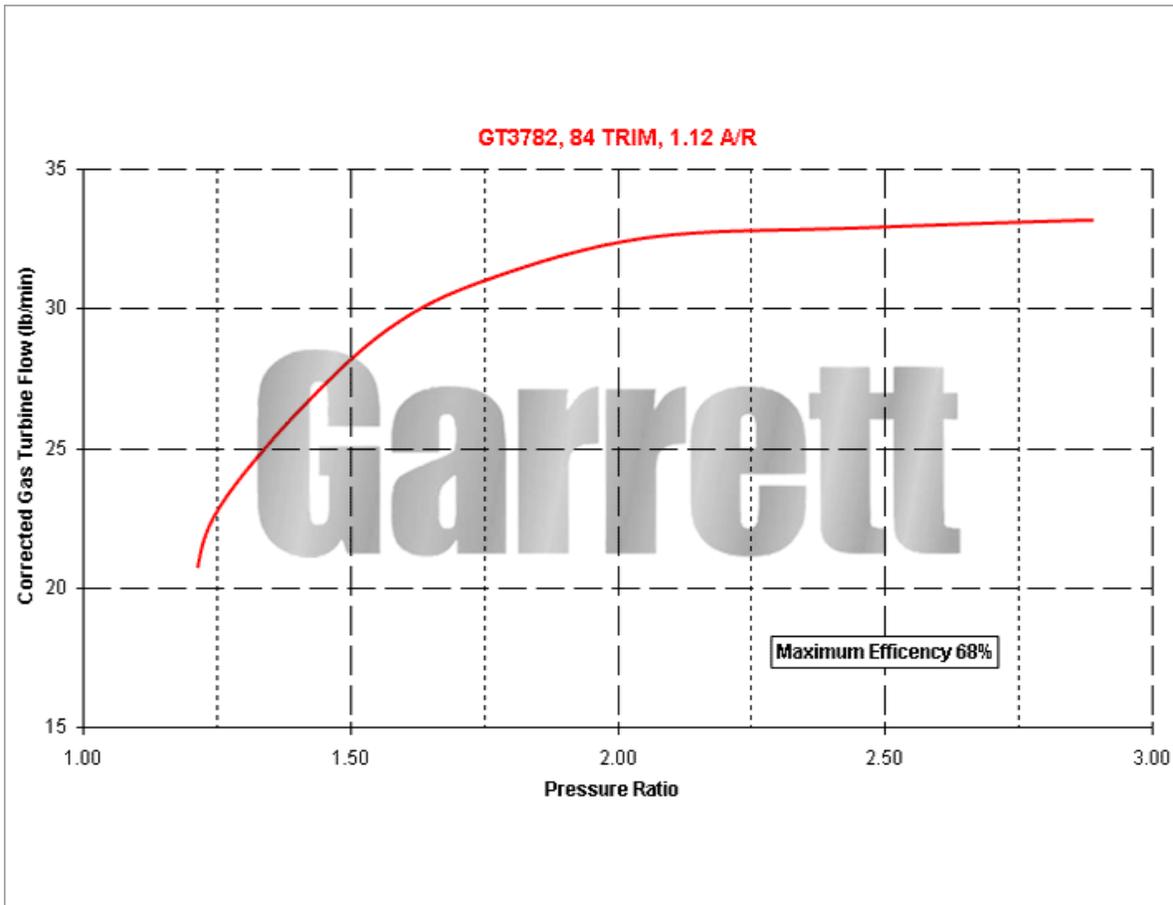


Fig. 19 Gráfica de desempeño de la turbina del GT3782. Ref. 11

MAPA DEL COMPRESOR

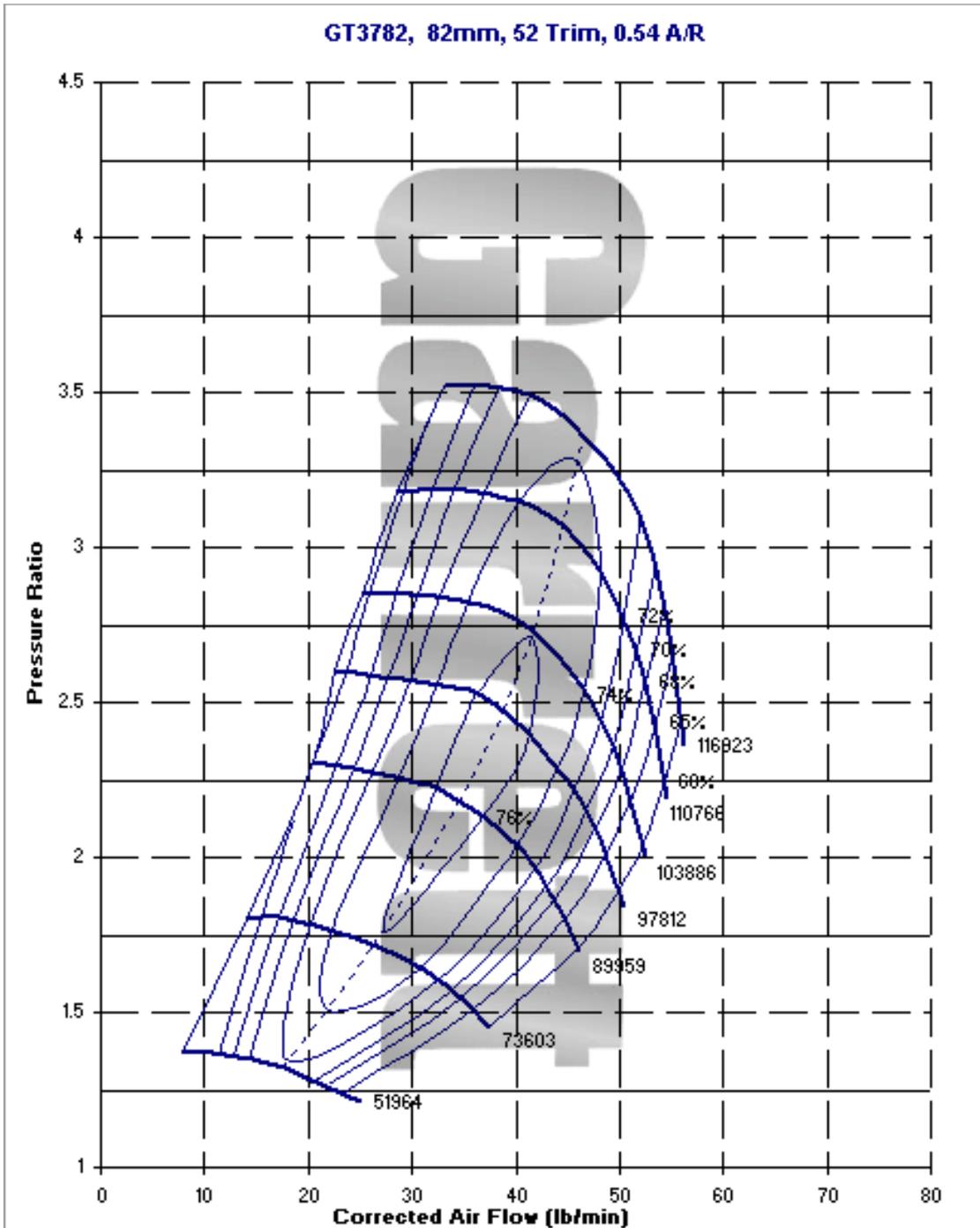


Fig. 20 Mapa de desempeño del compresor del GT3782. Ref. 11

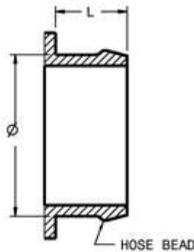
DIMENSIONES DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL TURBOCOMPRESOR

Garrett[®]
by Honeywell

GT3782
452159-3

Compressor Inlet

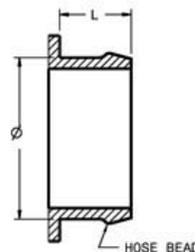
HOSE CONNECTIONS
TABULATED AS (Ø x L)



Ø 101.6 x 31.75

Compressor Outlet

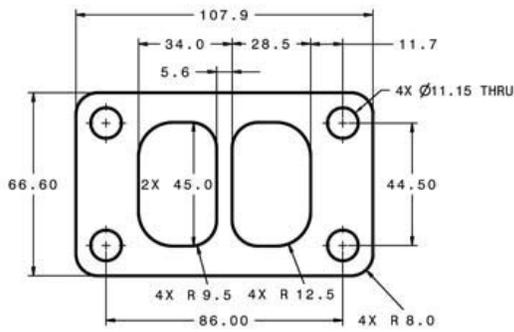
HOSE CONNECTIONS
TABULATED AS (Ø x L)



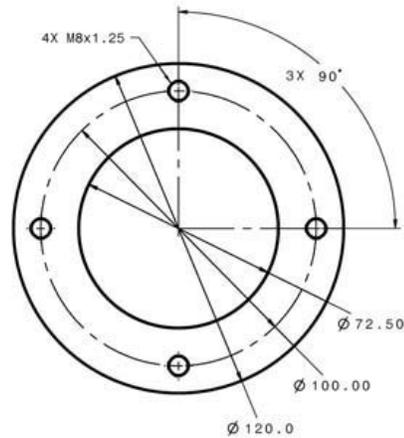
Ø 60 x 30

Turbine Inlet

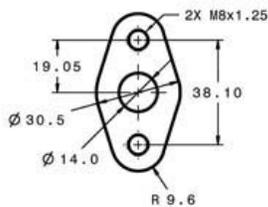
"T3 DIVIDED"



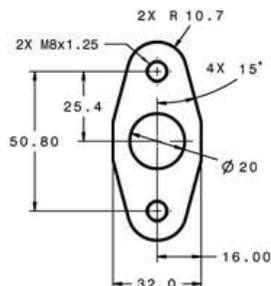
Turbine Outlet



Oil Inlet



Oil Outlet



Water

Not Applicable

All Measurements in MM

Fig. 21 Dimensiones de las entradas y salidas del compresor, turbina y aceite. Ref. 11.

1.5 Características de las válvulas de alivio

Integración de una válvula de alivio

Los ángulos de sangrado para las válvulas de alivio son de gran importancia para permitir a los gases de escape fluir fácilmente fuera del sistema. El gas de salida de la válvula de alivio que va de regreso al tubo de escape debería recibir el mismo tratamiento que cuando entró a ella. El principio aquí es evitar cualquier intervención con el flujo de gases que sale de la turbina. La interferencia provocará un aumento en la contrapresión, con lo cual se reduce la potencia.

En cualquier auto con convertidor catalítico, la descarga de la válvula de alivio debe ser regresada al tubo de escape antes del convertidor, porque todos los gases de escape deben pasar a través del convertidor.

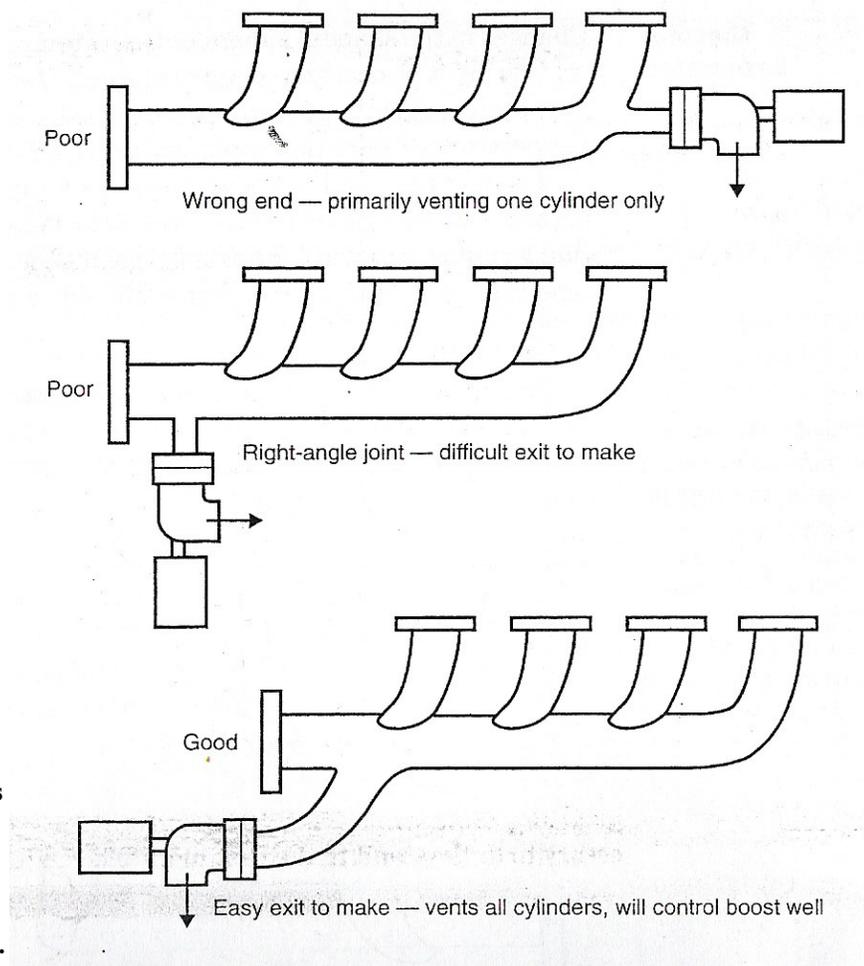


Fig. 22
Diferentes
configuraciones
de posición del
tubo de la
válvula de
alivio en el
múltiple. Ref. 1.

Cuando no se requiere convertidor, existe la opción de hacer un tubo de escape independiente para la válvula de alivio.

La importancia de crear un tubo separado es que efectivamente se incrementa el área transversal total del sistema de escape. En general, una válvula de alivio tendrá una mejor respuesta y de alguna manera más efectiva en controlar el incremento de presión cuando tiene su propio tubo de escape.

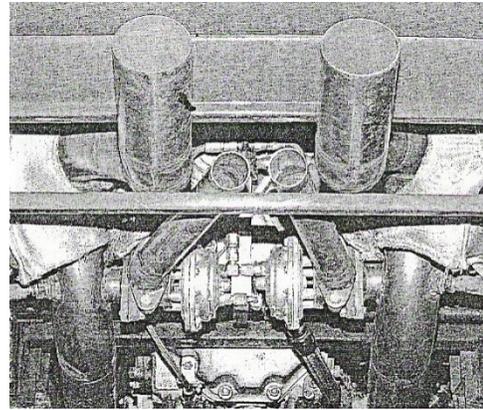


Fig. 23 Nótese los tubos de escape independientes para las válvulas de alivio. Ref. 1.

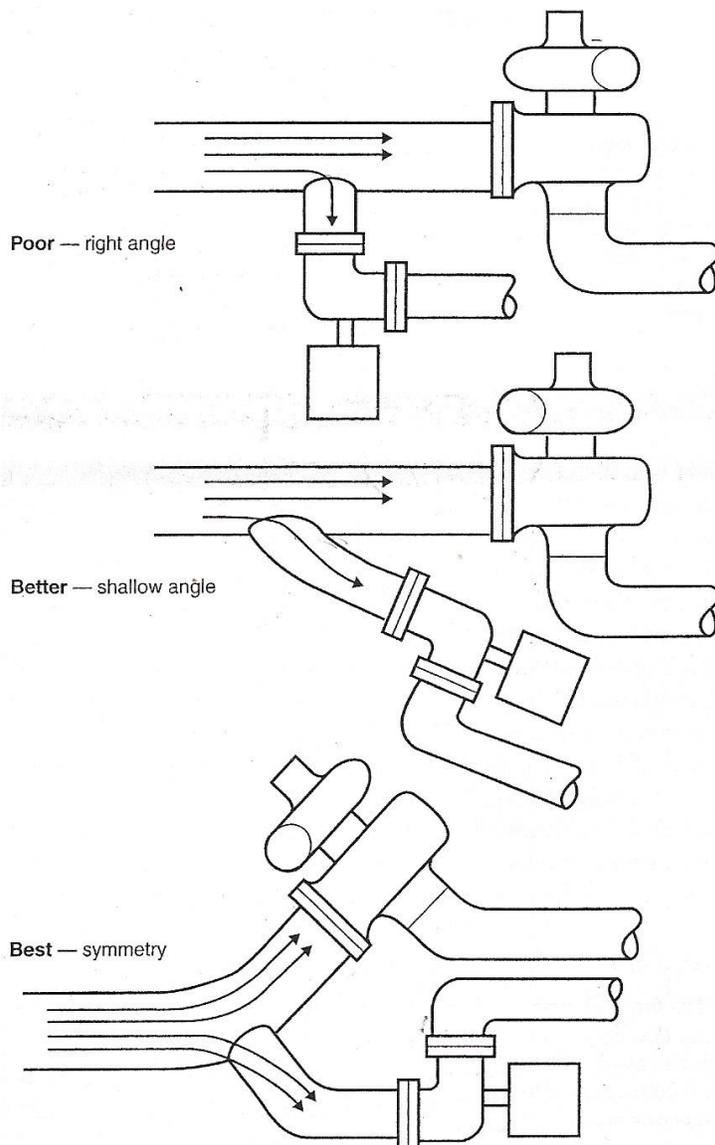


Fig. 24 Diferentes ángulos de salida para la válvula de alivio. Ref. 1.

El modelo de las dos válvulas de alivio es el F40 de la marca Tial sport⁴ que se dedica a fabricar, además de válvulas de alivio, válvulas de sobrepaso, turbocompresores, sistemas de turbocompresores, bridas para turbos y válvulas de alivio y accesorios.

Este modelo ofrece:

- Válvula de aleación base NiCrFe de alta temperatura y cubierta de la válvula 347SS que ofrece mayor tiempo de vida comparado con los diseños de otras marcas.
- Diafragma reforzado con Nomex de silicón de alta temperatura.
- El resorte actuador de acero inoxidable 17-7 PH da una presión constante aun a altas temperaturas, resiste hasta 900F (483°C).
- Para el asiento de la válvula se usa acero inoxidable Nitronic 60.
- Las bridas de conexión son del tipo 304L.
- Actuador de aluminio de color anodizado (negro, rojo, azul, púrpura).
- Las válvulas de alivio vienen con accesorios para instalación.



Fig. 25
Imágenes de
las válvulas
de alivio
modelo F40.
Ref. 12.

DIAGRAMA DE INSTALACION DE LA VÁLVULA DE ALIVIO

⁴ Tial sport: Empresa que se dedica a la fabricación de válvulas de alivio, válvulas de sobrepaso, turbocompresores, sistemas de turbocompresores, bridas para turbos y válvulas de alivio y accesorios.

TIAL

WG Installation

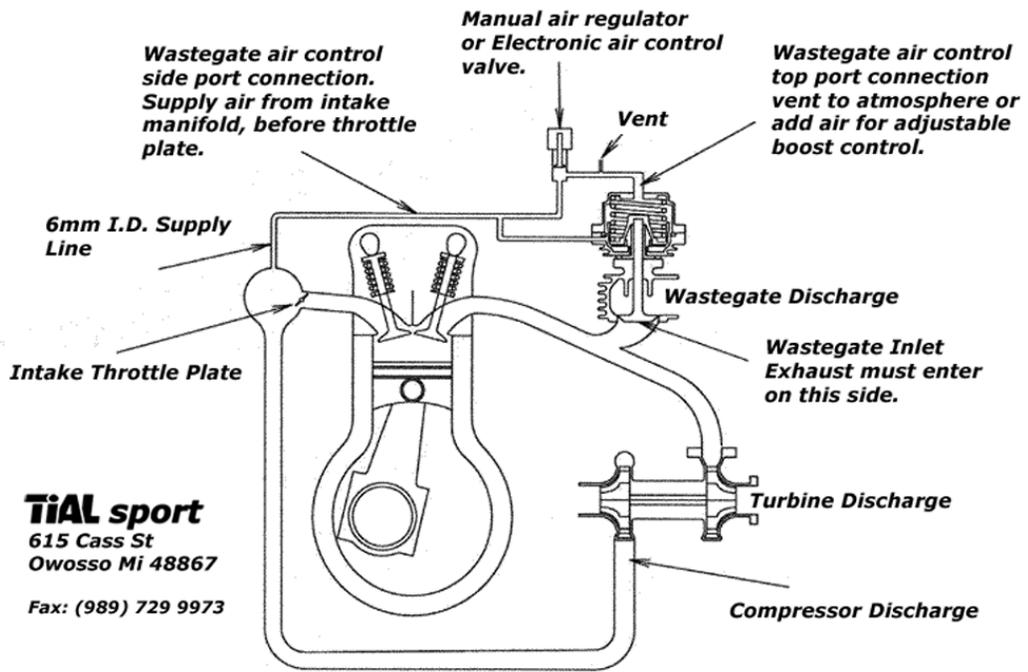


Fig. 26 Esquema de instalación de la válvula de alivio. Ref. 12

CAPITULO 2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ESCAPE

2.1 Diseño conceptual

Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño, son todos aquellos puntos que se consideran para llevar a cabo el diseño del sistema, cabe mencionar que estos parámetros tomados del proyecto global se analizaron y evaluaron de tal manera que algunos tuvieran un mayor o menor grado de importancia.

Lo anterior lo podemos ver reflejado en la siguiente tabla, misma que se utilizó al momento de estar conformando el sistema:

PARAMETRO\IMPORTANCIA	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Dimensiones de espacio destinado para el sistema	x									
Dimensiones de salida de los puertos de la cabeza	x									
Dimensiones de la salida y entrada del turbo	x									
Temperatura de descarga de gases del motor		x								
Forma del sistema					x					
Posición del sistema respecto al motor		x								
Acabado exterior del sistema						x				
Presión requerida por el turbocompresor	x									
Componentes alrededor del sistema	x									

Tabla 3 Parámetros de diseño

Otros parámetros que se consideraron fueron:

- Diseño optimizado en base al flujo, la presión, el montaje y la temperatura.
- Diseño paramétrico optimizado.
- Interacción optimizada con las otras partes del sistema, del motor y del vehículo.
- En base al orden de encendido del motor y al tipo de entrada de la turbina (T3), se requiere una configuración 4-2 para el múltiple, es decir, de los 4 tubos que salen del motor se hacen dos pares de ellos. En este caso, se juntan los tubos 1-4 y 2-3. Los gases de cada par de tubos debe entrar a una de las 2 entradas de la turbina.

- Tomando como base que este sistema va a ser un prototipo y no es necesario producirlo en serie, el método de fabricación adecuado es hacerlo a mano con tubos individuales soldados. Esto es porque el proceso de fundición es usado para producir en serie, con lo cual, a largo plazo se recupera la inversión que se hace para tener el molde. Fabricar este molde es muy costoso y en nuestro caso solo se necesitan dos modelos del sistema, por lo tanto la inversión para el molde no se recuperaría.

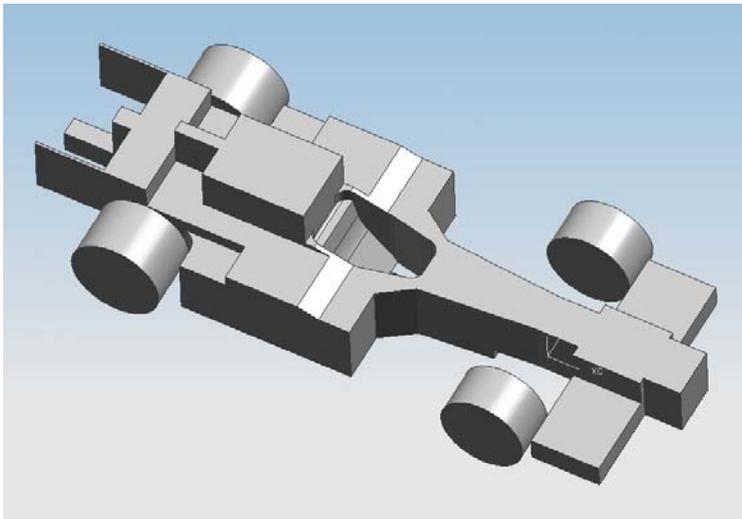
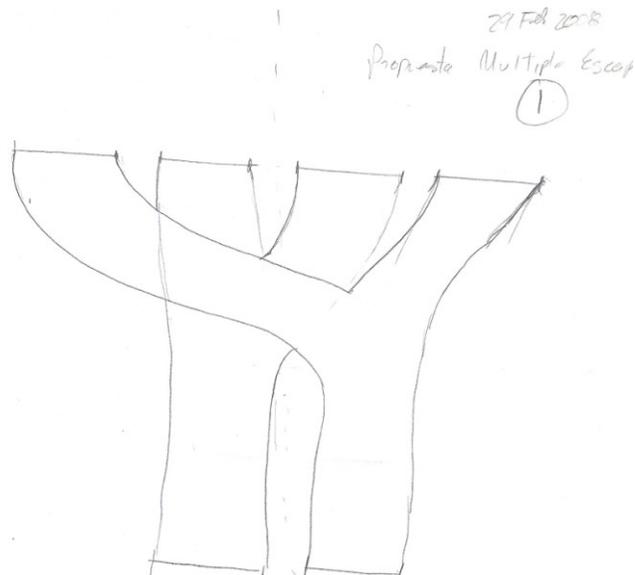


Fig. 27 Esquema de distribución de espacios en el vehículo. Ref. 13

En base a estas consideraciones se fueron realizando varios bosquejos de diferentes configuraciones del múltiple de los cuales aquí se presentan algunos:

**Fig. 28
Propuesta de
diseño del
múltiple de
escape H1**



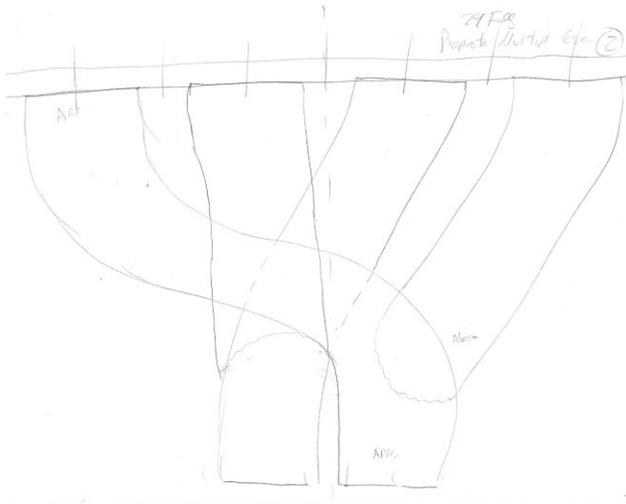


Fig. 29
Propuesta
de diseño
del múltiple
de escape
H2

El diseño que se escogió como base para el múltiple final fue el R2, ya que por el espacio tan reducido del compartimiento del motor, es necesario colocar el turbocompresor por debajo del múltiple y las válvulas de alivio, además el eje de rotación

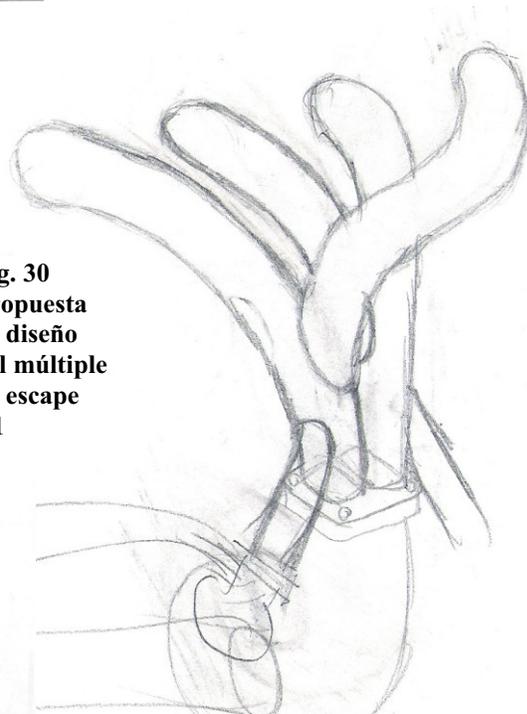


Fig. 30
Propuesta
de diseño
del múltiple
de escape
R1

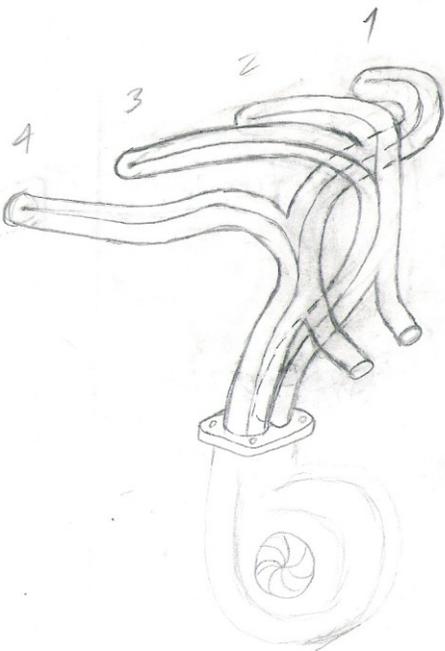


Fig. 31
Propuesta
de diseño
del
múltiple
de escape
R2

del turbo debe estar alineado con el eje de rotación del motor debido al proceso de lubricación del primero.

2.2 Cálculo

Cálculo del peso que necesita soportar el múltiple

Tomando como base que el auto tiene una aceleración lateral en curva de 23.1⁵ m/s² se tiene:

$$F = ar/g$$
$$F = \frac{23.1 \left(\frac{m}{s^2}\right)}{9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} = 2.35 g's$$

Al aplicar un factor de seguridad de 1.5:

$$F = (2.35g's) * (1.5) * (16) = 56.4 \text{ kg}$$

Donde 16 es el peso en Kg del turbo junto con las dos válvulas de alivio.

Se tiene que el peso total que debe soportar el múltiple de escape en condiciones críticas es de 56.4 Kg.

Cálculo de los diámetros de los tubos del sistema

Para los sistemas de escape por regla general se tiene que los tubos deberán mantener las mismas dimensiones que las que se tienen a la salida del motor, a excepción de aquellas partes en las que si se tiene uniones de flujo, entonces, las dimensiones del tubo siguiente serán de la suma de las dimensiones de los tubos que llegan a esa unión.

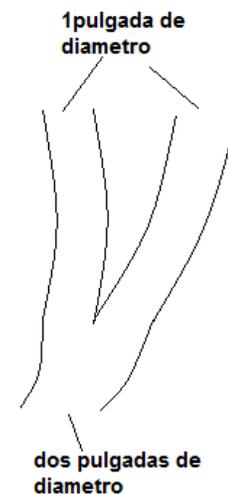


Fig. 32 Unión de dos tubos de escape. Ref. 15

⁵ Dato obtenido de simulaciones hechas por la universidad Brigham Young en Provo Utah, EUA

Cabe mencionar que para el caso específico de nuestro múltiple, los cilindros del motor no expulsan aire al mismo tiempo, por lo que las dimensiones de los tubos serán aproximadas o similares a las dimensiones de los puertos de la cabeza del motor.

Debido a la mayor disponibilidad de tubos de acero de sección circular que de sección cuadrada o rectangular se seleccionó como base la sección circular para realizar los cálculos.

Teniendo el área de los puertos de salida del motor se calcula el diámetro interno de los tubos del múltiple de escape, tomando la sección circular:

$$A_p = 1064.4 \text{ mm}^2$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(1064.4)}{\pi}}$$

$$d = 36.8135 \text{ mm} = 1.4493 \text{ in}$$

Con este diámetro interior encontramos la medida de un tubo comercial de 1" 5/8 de diámetro exterior y un espesor de 0.074" lo cual nos da un diámetro interior de 1.4761".

Para los tubos del múltiple que van a las válvulas de alivio, las cuales tienen un diámetro de entrada de 40mm=1.5748in, se encontró un tubo de 1 5/8" de diámetro exterior de calibre 16.

En cuanto a los tubos de escape tenemos:

Para el tubo de salida de la turbina se tomo el diámetro interno de salida del turbo que es de 72.5mm=2.8543in, para el cual se encontró una medida comercial de tubo con diámetro exterior de 3" de calibre 16.

El diámetro de salida de las válvulas de alivio es de 35.6mm=1.4015in con el cual se encontró un tubo de 1 5/8" de diámetro exterior de calibre 16.

Con todos los datos anteriores se construye la siguiente tabla:

TUBO	D (in)	Calibre
Múltiple	1 5/8	16
Entrada válvula de alivio	1 5/8	16
Escape turbo	3	16
Escape válvula de alivio	1 5/8	16

Tabla 4 Dimensiones de los tubos del sistema

Cálculo del flujo másico de aire en el motor

La eficiencia volumétrica es la relación de masa que entra al cilindro entre la masa que teóricamente tendría que entrar. Para el propósito de este proyecto tomaremos una eficiencia volumétrica de 120% dado que el motor es sobrealimentado.

Con los siguientes datos se calcula el flujo de aire:

$$cid = 2.2 \text{ l} = 134 \text{ cu in}$$

$$rpm_{max} = 7750$$

$$Af = \frac{cid \times rpm \times 0.5 \times E_v}{1728} = \frac{134 \times 7750 \times 0.5 \times 1.2}{1728}$$

$$Af = 360.5902 \text{ cfm}$$

Donde el 0.5 se debe al hecho de que un motor de cuatro tiempos llena sus cilindros solo una mitad de las revoluciones y el 1728 convierte pulgadas cúbicas a pies cúbicos.

Para convertir cfm a libras de aire por minuto se multiplica cfm por la densidad del aire a la altitud de trabajo y por la gravedad.

$$\rho = 0.0023769 \text{ slug/ft}^3$$

$$g = 32.2 \text{ ft/s}^2$$

$$Af * \rho * g = lb/min$$

$$Af = 360.5902 * 0.0023769 * 32.2$$

$$Af = 27.5982 lb/min$$

Cálculo de la velocidad en la sección

Con el valor de flujo másico de aire encontramos la relación de presiones que van a manejar la turbina y el compresor porque se puede considerar que el flujo másico que entra a la cámara de combustión es el mismo que sale.

Con el mapa del compresor (ver Fig. 20) encontramos que la relación de presiones en este componente es de 3.1, cuando la máxima que se puede producir es 3.5.

Para la turbina (ver Fig. 19) tenemos una relación de presiones de 1.4 y la máxima que es de 2.8. Con este valor se obtiene la presión de diseño crítica para los tubos del múltiple de escape:

$$Presión_de_diseño = PA * RP_{max} * factor_de_seguridad$$

$$PD = 14.7 * 2.8 * 1.5$$

$$PD = 61.74 psi = 425.565 KPa$$

Ahora, tomando una temperatura crítica de $600^{\circ}C = 873^{\circ}K$ y el valor de la constante de los gases de escape $R = 0.284 KJ/Kg^{\circ}K$ se calcula la densidad en el múltiple:

$$P = \rho RT$$

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{425.565 KPa}{0.284 KJ/Kgk * 873k}$$

$$\rho = 1.7164 Kg/m^3$$

Con este valor de densidad, el área de la sección y el flujo másico de aire antes calculado en Kg/s dividido entre 4 (porque se requiere en un ducto) se calcula la velocidad.

$$V = \frac{Af}{\rho A} = \frac{(0.2098 Kg/s)/4}{1.7164 Kg/m^3 * 0.0010644 m^2}$$

$$V = 28.7198 m/s$$

2.3 Modelado del sistema

Unigraphics NX4

Unigraphics es un completo sistema CAD/CAM/CAE en tres dimensiones, con una estrecha relación entre todos sus módulos. Combinando todos ellos se puede diseñar, analizar, crear planos y programas de mecanizado del producto.

Unigraphics proporciona diseño basado en curvas y superficies paramétricas. Esta es una de sus principales y más importantes características, ya que asegura una total asociatividad del diseño, tanto internamente (asociatividad entre entidades geométricas) como externamente (asociatividad con los módulos de CAM y CAE).

UG se basa en el núcleo modelador subyacente, Parasolid, desarrollado directamente por Unigraphics Solutions. Este núcleo proporciona una extensa librería de funciones orientadas a objetos, especialmente desarrolladas para el modelado sólido.

Proceso de modelado del sistema de escape

Cuando se trabaja en un proyecto colaborativo se deben de establecer ciertas restricciones, con la finalidad de evitar errores en el diseño, un ejemplo claro, es la interferencia entre partes al momento de hacer el ensamble general del sistema.

Para comenzar el modelado hay una lista de parámetros que se deben de considerar, la cual se enlista a continuación.

- Realizar un Esqueleto en el que quede definida:
 - o la interfaz (espacio disponible para el sistema) entre los puntos de apoyo del sistema con el motor y con el turbocompresor.
 - o La posición del sistema de coordenadas utilizado
 - o Los planos y puntos utilizados para su construcción

- Espacio disponible
 - o Establecer un modelo de referencia para determinar espacios respecto al reglamento de la Formula 1. (ver Fig. 27)
 - o Conocer las dimensiones asignadas para el subsistema.

- Estar en constante comunicación con UTEP, Toronto y BYU, para determinar parámetros de diseño.
- Diseño parametrizado
 - Determinar cuáles dimensiones pueden llegar a ser modificadas
 - Guardar como fue parametrizado el modelo en caso de que existan consultas en un futuro.

Para facilitar la ubicación de las partes por las que se conforma el sistema, dentro del modelado, es conveniente separar en capas cada tipo de elemento, tales como líneas de referencia, superficies, sólidos, planos de trabajo y puntos.

El trabajar de esta manera permite hacer un diseño limpio y sin confusiones, por esta razón se han establecido las capas en las que se trabajaran los modelos para cada parte del vehículo, y todas las universidades deberán de apegarse a ellas.

<u>Layer</u>	<u>Descripción</u>
X1	Geometrías de referencia- Planos de construcción, puntos, líneas de referencia
X2	Sketch- Dibujos en dos dimensiones colocados sobre un plano de construcción
X3	Sólidos
X4	Superficies
X5	Curvas tridimensionales – líneas en los ejes X, Y y Z

Tabla 5 Convención de capas (layers) para Unigraphics

Una vez definidas las restricciones, es posible comenzar con el modelado del sistema, cabe mencionar que la construcción del sistema virtual, sigue los mismos pasos, ya que lo laborioso es la construcción de los tubos, por lo tanto el procedimiento se explicara para dos conductos de escape, y los dos restantes se realizan exactamente de la misma manera.

Paso 1 Construcción de la geometría de las bridas.

El primer paso consiste en hacer la geometría que tendrán las bridas que se acoplaran al motor, al turbocompresor y a las válvulas de alivio.

La geometría de la brida que se acopla al motor fue proporcionada por la universidad de El Paso, Texas, nos enviaron el sketch con las dimensiones y la geometría del perfil que se debe de utilizar.

La geometría y dimensiones de la brida que acopla con el turbocompresor, se tomo de la figura 21.

Entonces, para generar la brida del motor, lo primero que se hace es generar un plano de trabajo, en el plano z_c-y_c , una vez generado, se copia el archivo de la geometría de la brida, haciendo $ctrl+c$ y después en el archivo nuevo se oprime la combinación $ctrl+v$ y nos aparecerá un recuadro que nos pedirá un plano de referencia (ver Fig. 33).

Ahora se coloca un plano en x_c-y_c en la coordenada:

- 140x,
- -10.25y
- -100z.

Y a base de líneas, círculos y fillets, se construye la geometría idéntica a la figura 21. (ver Fig. 34)

Se realiza el mismo procedimiento para la construcción de las bridas de las válvulas de alivio únicamente que el plano de referencia ahora sera ubicado en el plano x_c-z_c , y en las coordenadas:

- -43.98x,
- 250.77y,
- -18.62z

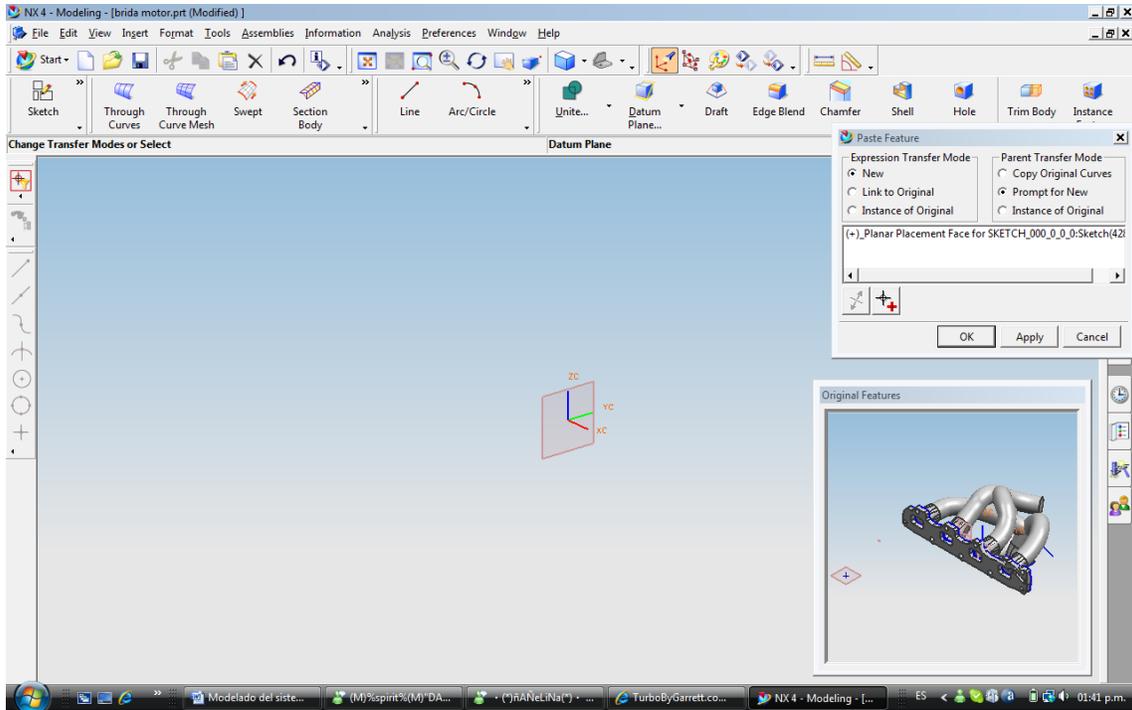


Fig. 33 Referencia de posicionamiento de la brida del motor

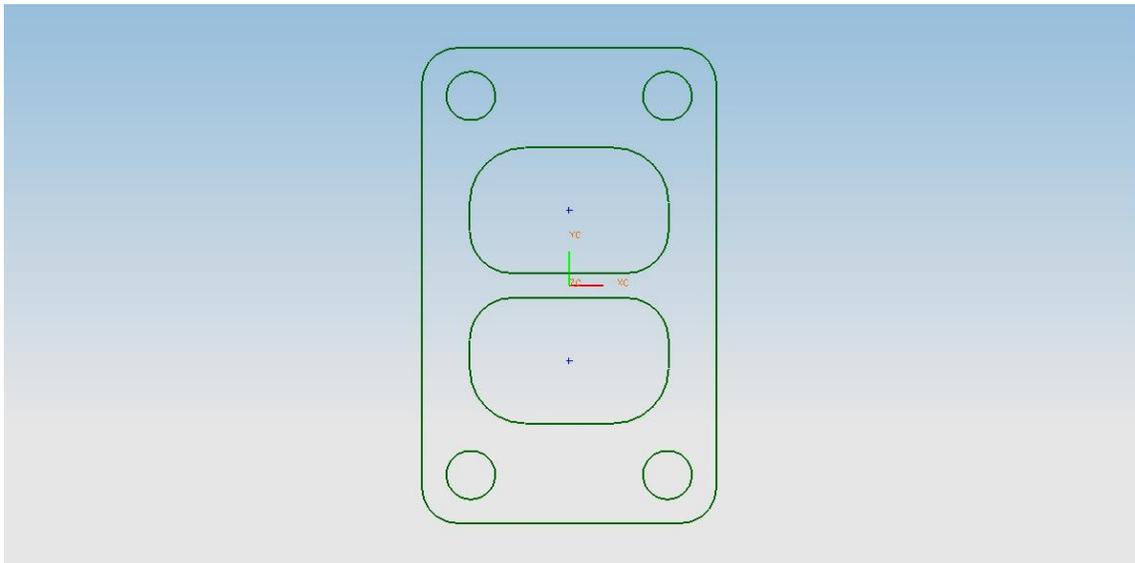


Fig. 34 Construcción de la brida del turbo en base a la figura 21

Para la primera brida y para la segunda serán las coordenadas (Fig. 35)

- 68.0173x
- 165.77 y

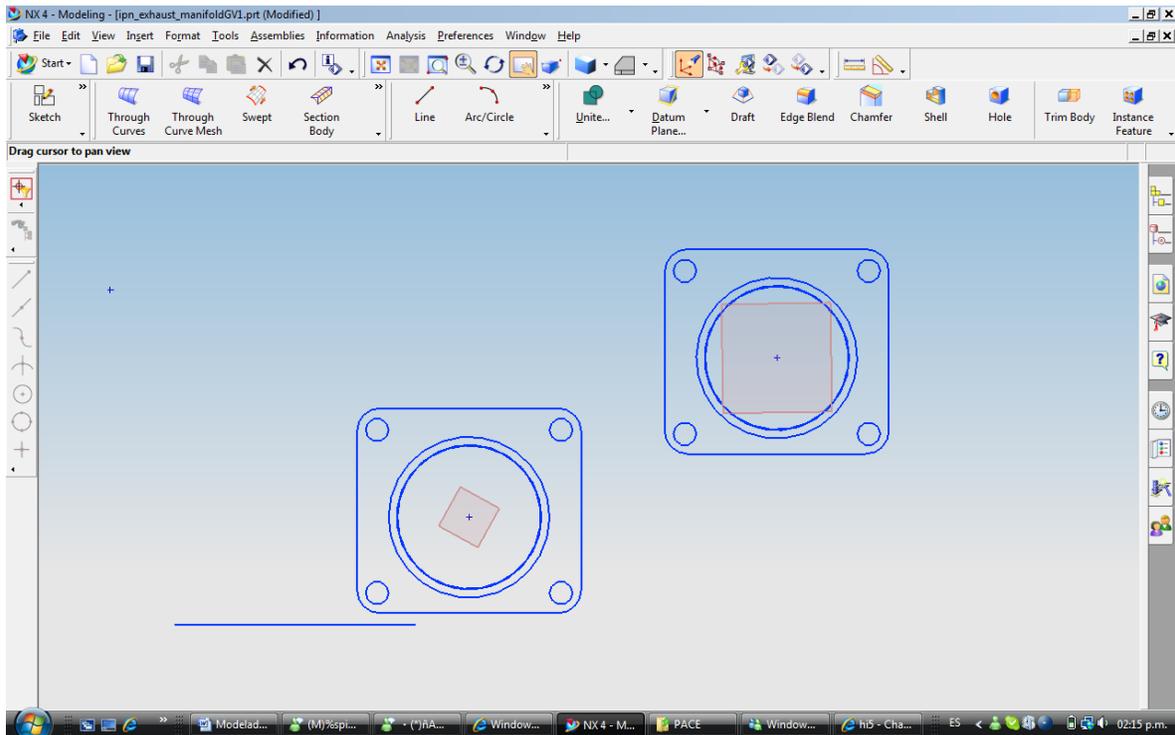


Fig. 35 Posicionamiento de las bridas de las válvulas de alivio

- -62.82 z

Paso 2.- Construcción de las curvas de referencia para los ductos de escape.

Este paso requiere de habilidad paciencia y dedicación para el manejo de las curvas en 3D, ya que requiere que sean manejadas de manera que no se intercepten en ningún punto unas con otras, además se debe de considerar y tener en mente el diámetro de los tubos para evitar interferencias entre ellos, la elaboración de las curvas es exactamente la misma en todos los casos solo que cada una es diferente a lo que geometría se refiere.

Lo primero que se hace es trazar una spline, del centro del primer ducto de descarga en la brida del motor hacia el centro de la toma del lado izquierdo de la brida del turbocompresor (ver Fig. 36), cuando se realiza este proceso el menú nos

permite seleccionar el número de puntos de control deseados para esto seleccionaremos cinco puntos de control,

Cabe señalar que los ductos correspondientes a los cilindros 1 y 4 se unirán en la toma izquierda del turbo y los ductos 2 y 3 en la toma derecha.

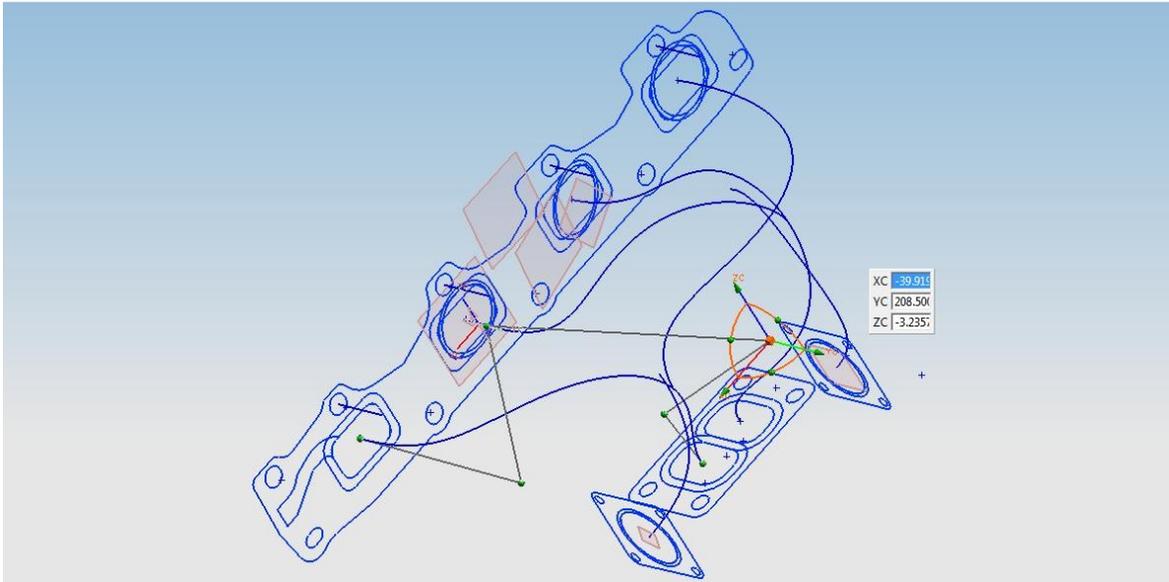


Fig. 36 Creación y manipulación de las curvas de construcción

De la manera mencionada se construyen todas las curvas, incluso las que van a descargar en las válvulas de alivio.

Paso 3.- Construcción del esqueleto que definirá los ductos de descarga

Para poder construir el sólido, lo primero que se debe de hacer en el diseño de el sistema de escape debido a la complejidad de su geometría, es generar un esqueleto a partir del cual se modelaran las superficies de una manera más sencilla.

Una vez definida la geometría de las curvas de construcción de los ductos de descarga, deberán de establecerse planos de trabajo a lo largo de cada una de las curvas, esto se hará creando en un archivo nuevo la sección transversal del tubo, únicamente con dos círculos concéntricos, de 44.45mm y 39.264mm.

Asimismo realizado esto colocaremos planos de trabajo a lo largo de las curvas de construcción, seleccionando la opción de plano sobre una curva (ver Fig. 37)

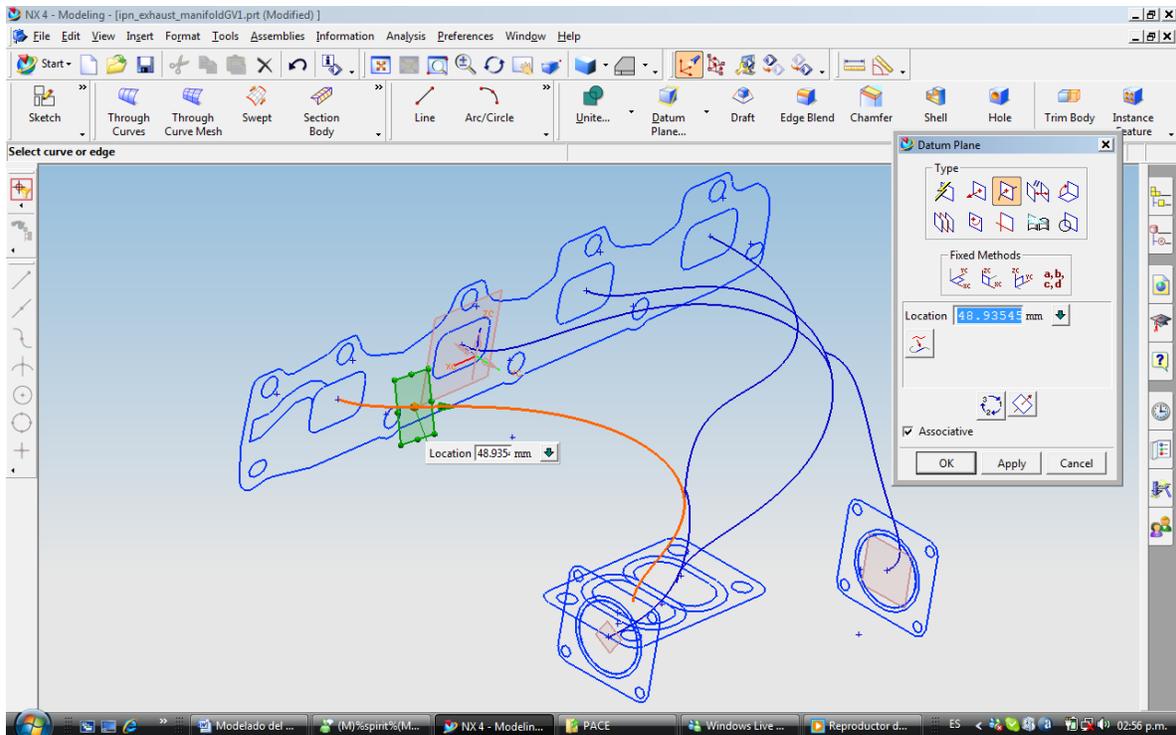


Fig. 37 Ubicación de los planos de trabajo a lo largo de las curvas de construcción

Cuando los planos a lo largo de las curvas estén definidos, se procede a copiar los sketch de la sección transversal del tubo creada anteriormente en un archivo nuevo, para hacer la copia se realiza el mismo procedimiento que al copiar la brida del motor (ver Fig. 33), este proceso se realizara para todos los planos en las curvas de control (ver Fig.38).

Es necesario mencionar que cuando se construyan los esqueletos de los ductos de descarga una vez que cada ducto este armado, se envíen a los layers correspondientes, en base a la convención de layers.

Ej.: El tubo uno se enviara al layer 42, ya que se está trabajando con sketch y les corresponde la terminación en 2, el ducto dos se enviara al 52 y asi sucesivamente, se pueden colocar los demás sketch de cada una de las bridas en otro layer distinto pero con la terminación correspondiente.

Para hacer esto, basta con seleccionar el menú *format-layer settings-move to layer* y cuando aparezca el menú seleccionar los sketches y planos deseados y asignar un número de layer (ver Fig. 39).

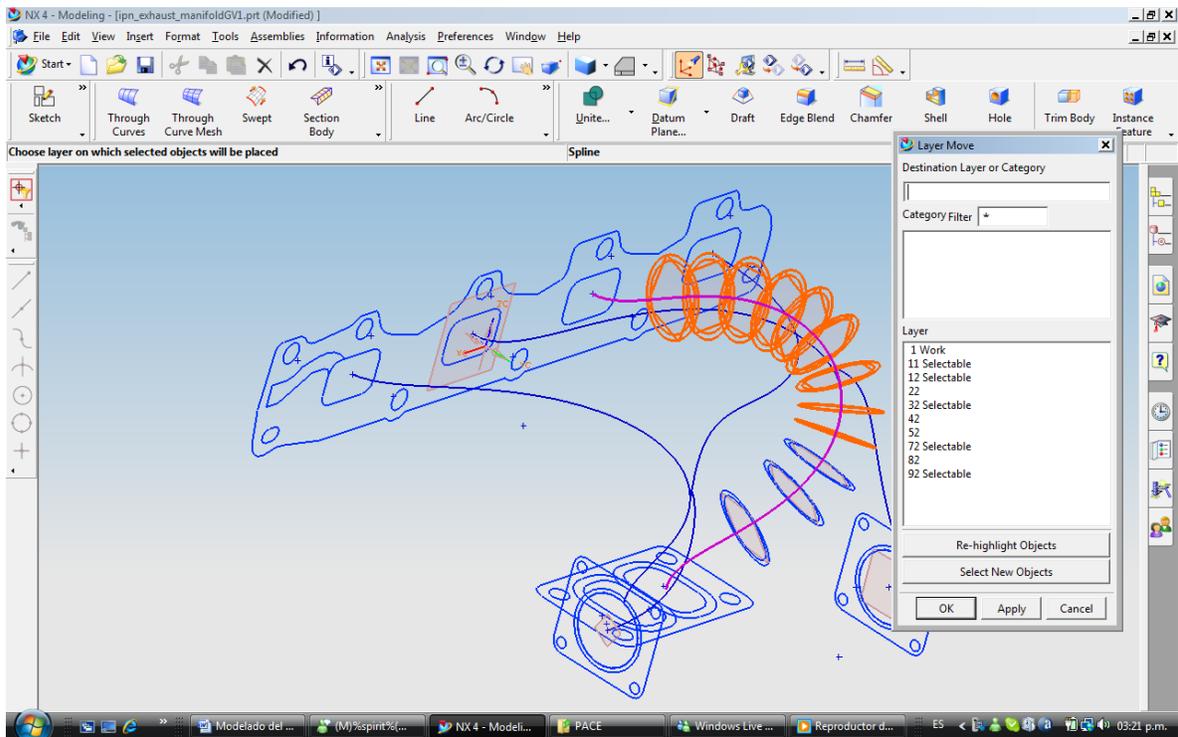


Fig. 38 Asignación de layers para las curvas de construcción

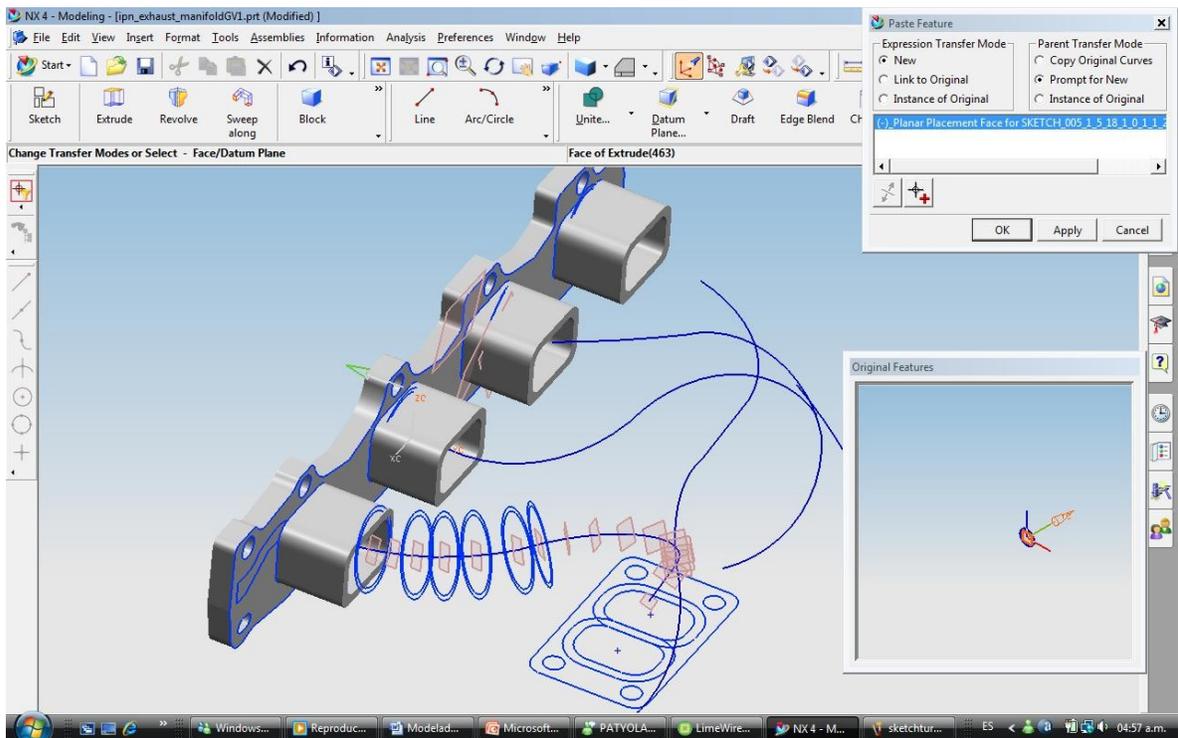


Fig. 39 Copia del sketch de la sección transversal a lo largo de la curva de construcción

Paso 4.- Creación de los sólidos

Una vez que se ha construido el esqueleto del modelo, es preciso comenzar con la creación del sólido a partir de las curvas, planos y sketch generados.

La herramienta que utilizaremos para la creación de los ductos será la de through curves, ya que esta herramienta nos permite generar un sólido a partir de varias curvas, permitiéndonos variar las formas y embonarlas perfectamente.

Lo primero que se debe de hacer es seleccionar del menú surface, la opción through curves, la cual nos desplegara un menú, en el que seleccionaremos las curvas exteriores de la sección circular, cuando este seleccionada la curva se debe de hacer clic con el botón central del mouse para confirmarla, aparecerá una flecha, esta flecha se deberá de conservar en el mismo sentido para las selecciones posteriores, este proceso se debe de realizar para todos los planos ubicados a lo largo de la curva (ver Fig. 40).

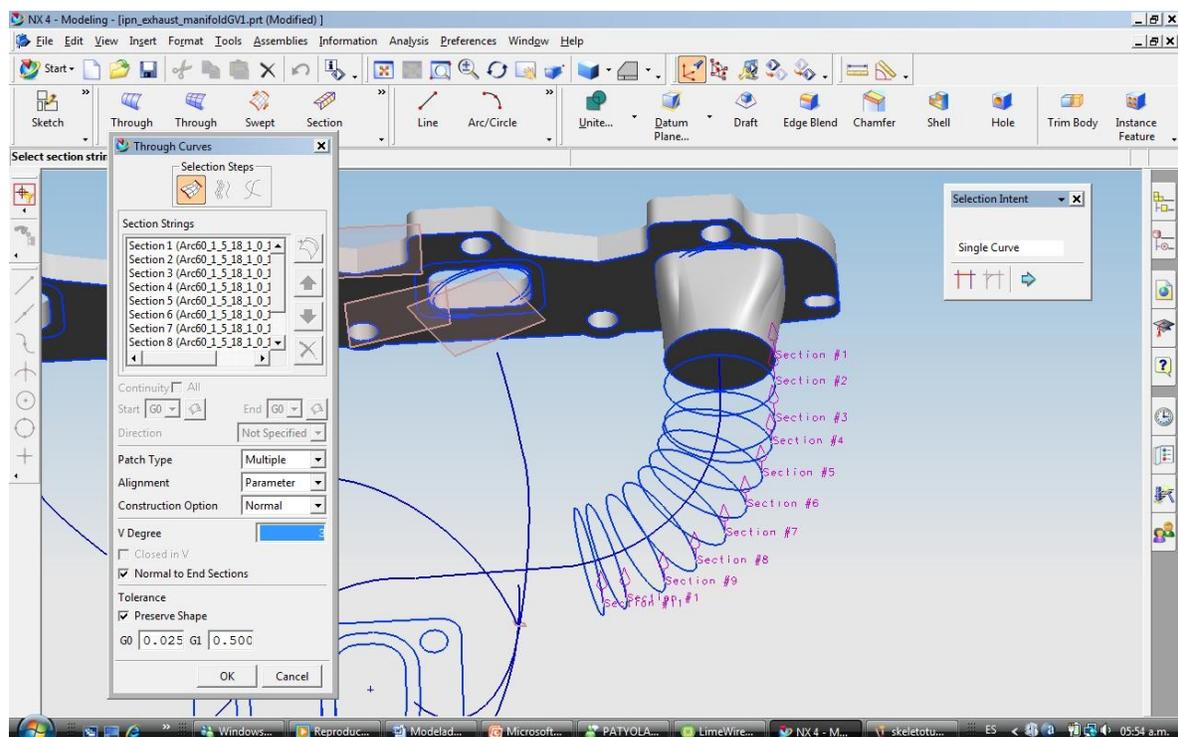


Fig. 40 Construcción del sólido de los ductos de descarga

Este procedimiento se debe de realizar para cada uno de los ductos, así como para las secciones internas y externas de los ductos.

Una vez que todos los ductos están generados, es preciso hacer la unión de los sólidos que definirán la superficie externa del modelo y de esta manera poder modificarlos. La acción se realizara con la opción UNITE (ver Fig. 41) Se deberán de unir los ductos exteriores correspondientes a los cilindros uno y cuatro (ver Fig. 31) sin embargo para los ductos interiores solo se unirán los ductos de manera individual, es decir, habrá un ducto para el cilindro uno, uno para el dos y así sucesivamente. La razón por la que los ductos interiores no se unen, es debido a que al momento de ser extraídos de los sólidos más grandes, podemos generar una superficie interna mejor y con los canales bien definidos.

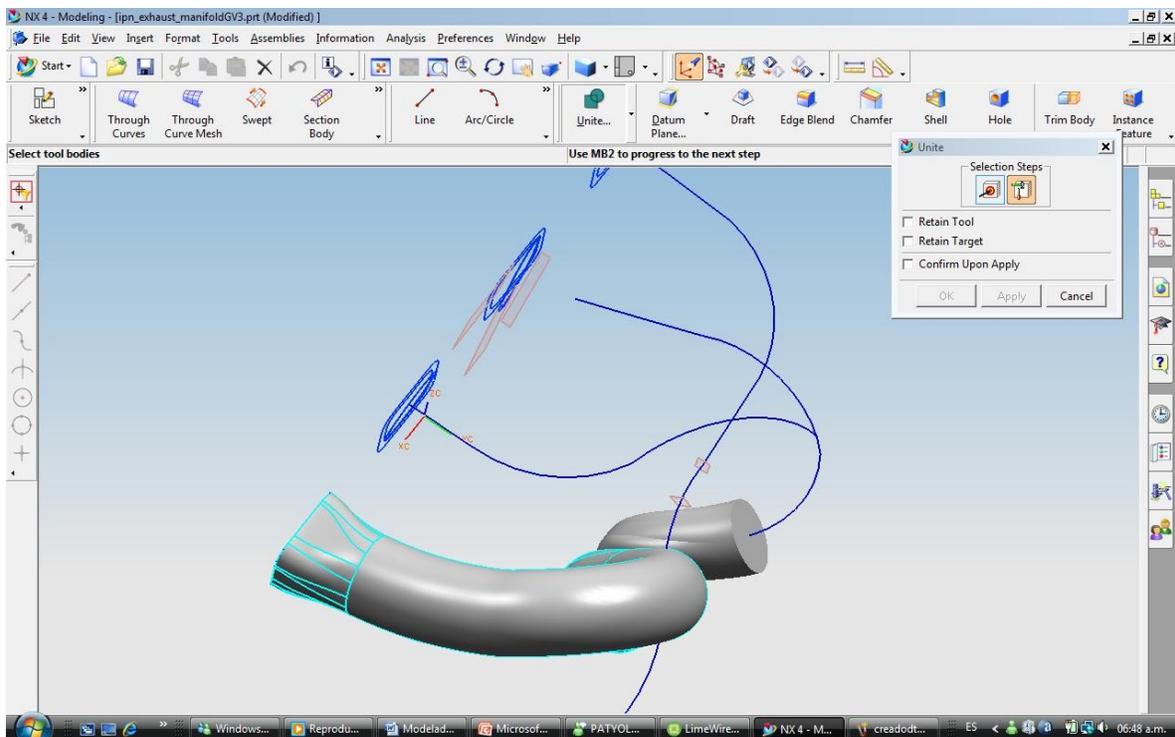


Fig. 41 Unión de los sólidos que generan el ducto exterior

Ahora para realizar la extracción de los sólidos, basta con activar el comando *subtract* (ver Fig.42), y para quitar los sólidos seleccionamos primero el sólido que queremos retener (para este caso serán los tubos 1 y 4 unidos previamente) y después el sólido que deseamos retirar (primero seleccionamos el ducto 1 y una vez retirado seleccionamos el 4), y entonces quedan hechos los ductos.

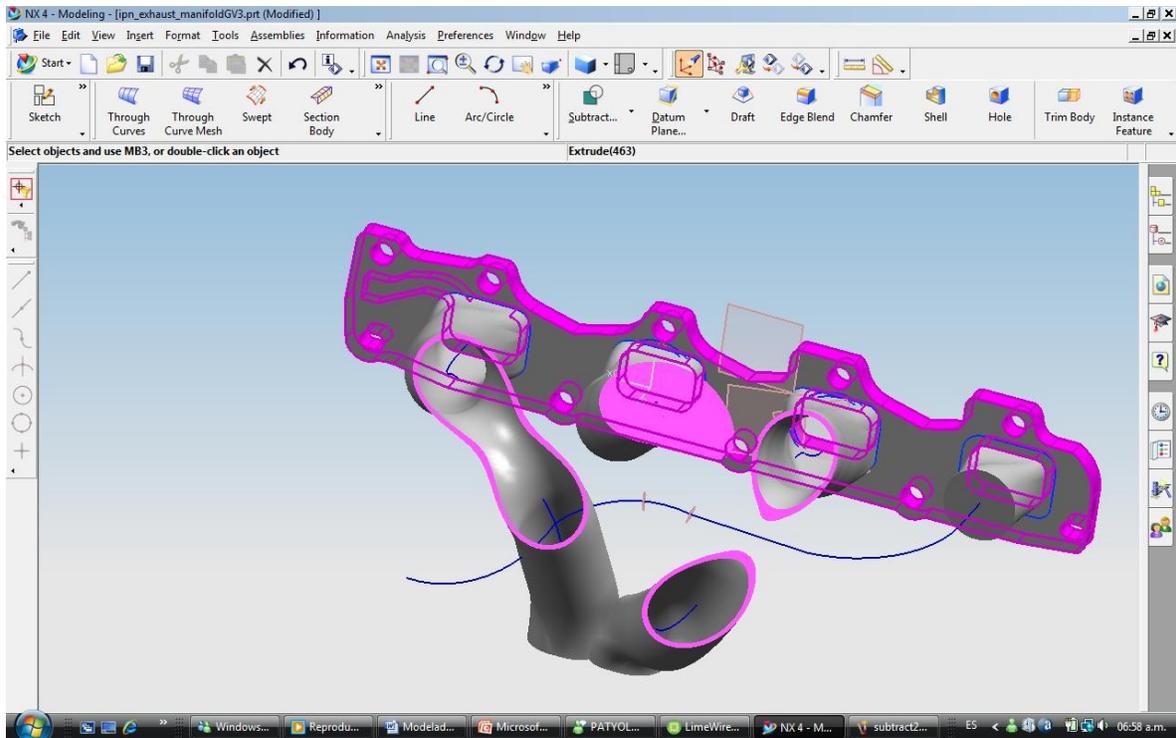


Fig. 42 Ductos definidos al aplicar *subtract*

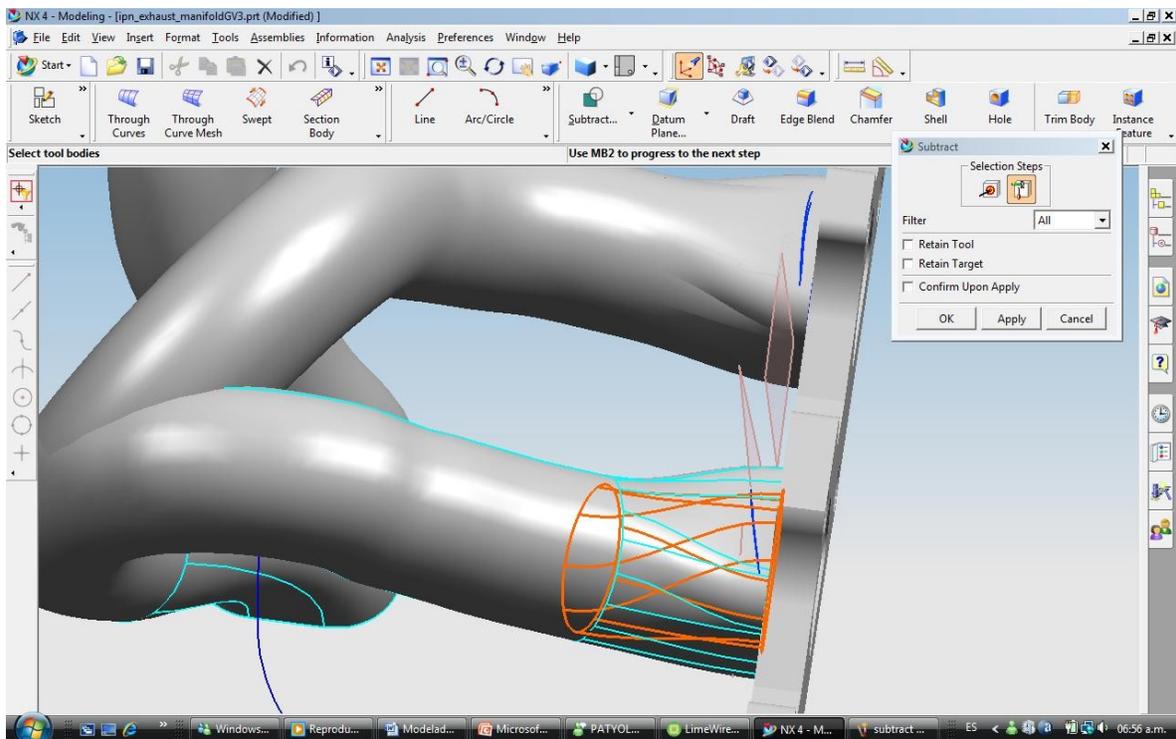


Fig. 43 Comando *subtract* aplicado a los ductos

Una vez aplicado el substract, lo único que queda por hacer es unir todas las piezas del modelo para hacerlo un sólido (ver Fig. 44).

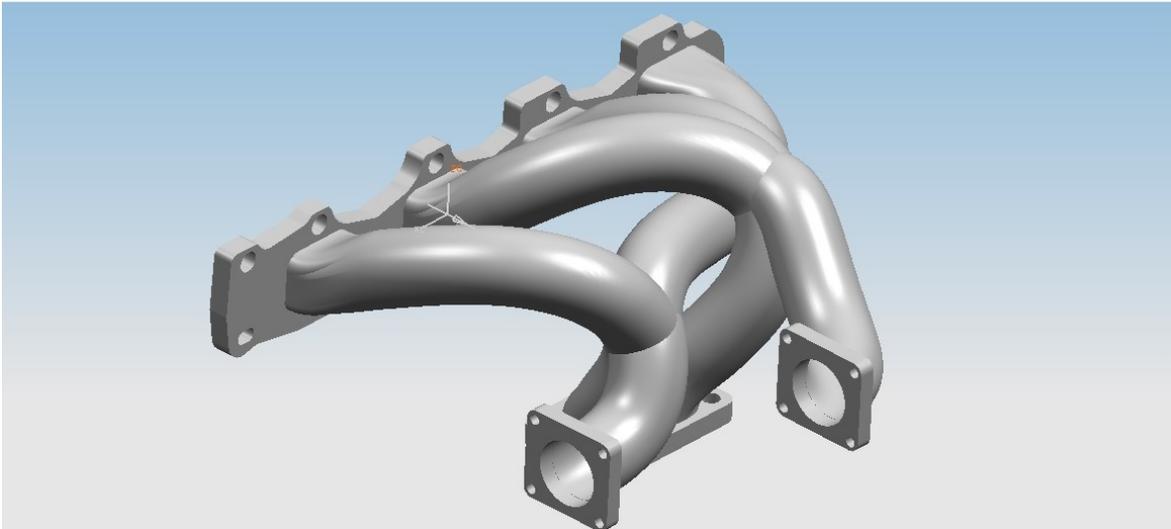


Fig. 44 Modelo terminado

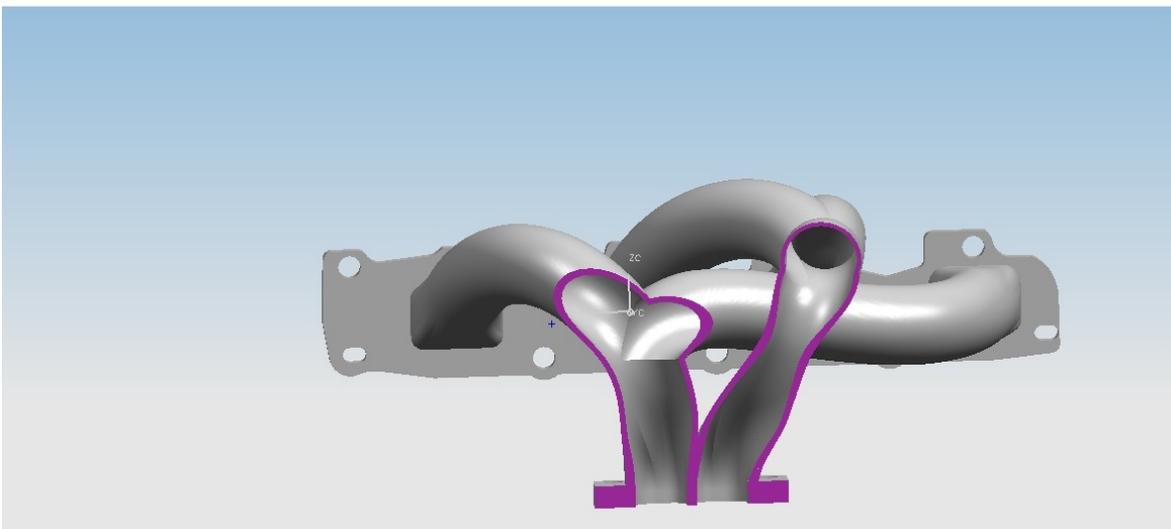


Fig. 45 Corte a la sección de los ductos de descarga

Modelos realizados

Durante la etapa de diseño de detalle, se realizaron los modelos que se presentan a continuación, todos fueron modelados con el mismo proceso mencionado anteriormente.

Primer modelo

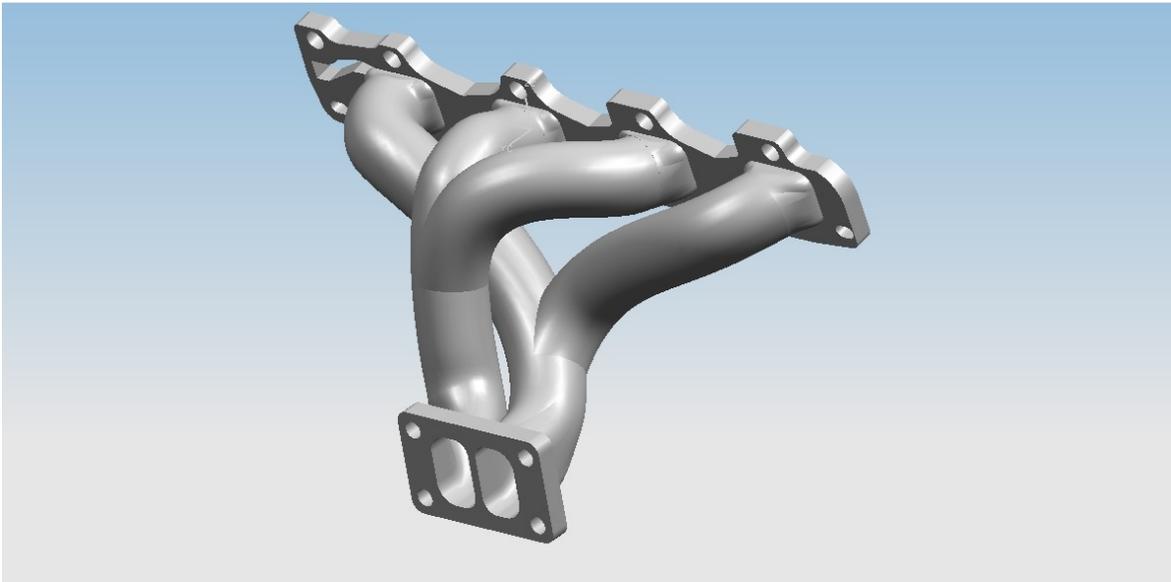


Fig. 46 Primer modelo de múltiple de escape

El primer modelo, fue diseñado después de documentarnos en la fabricación de múltiples de escape para vehículos de competición, se diseño este modelo., el cual está hecho de perfil tubular, se considero utilizar este perfil debido a su facilidad de manejo en la manufactura, y nos permite adoptar formas más complejas.

Este modelo, permitirá el acoplamiento de las válvulas de alivio, para cada par de ductos, permite la correcta evacuación de los gases de escape y las curvas suavizadas reducen la fricción y pérdidas por rozamiento.

Este es el primer modelo que se concibe, con la posibilidad de quedar como definitivo ya que casi no presenta problemas, excepto, por el espacio disponible en la carrocería automóvil, por lo que el diseño quedo pendiente.

Segundo modelo

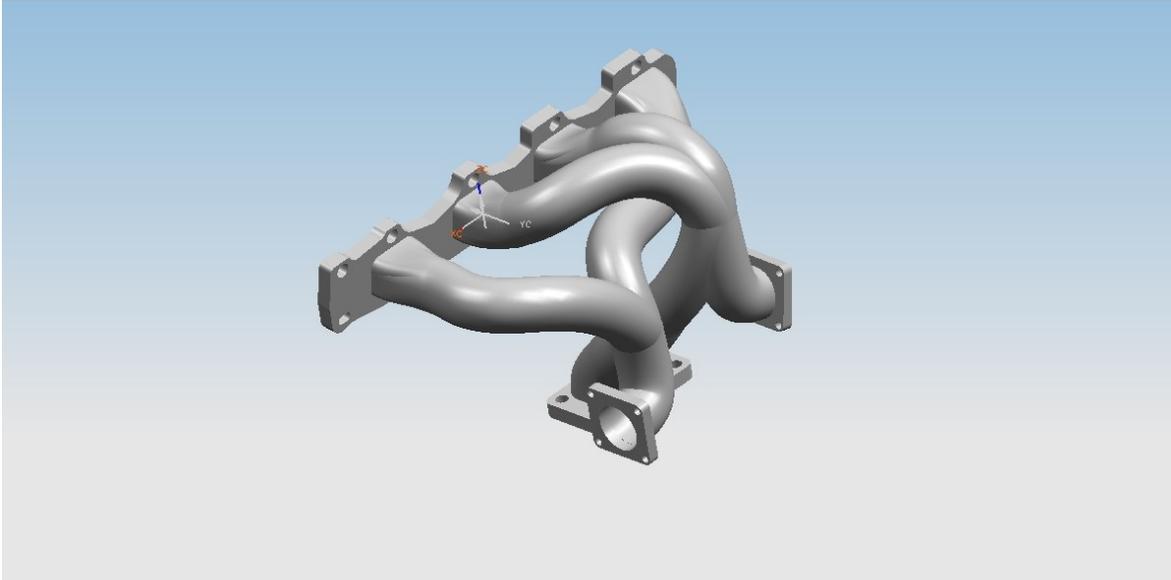


Fig. 47 Segundo modelo del múltiple de escape

El diseño de este modelo, fue el primero en el que se consideraron las restricciones de espacio, ya que el equipo encargado de la integración del vehículo, nos brindo el modelo del espacio disponible, sin embargo hacían falta partes, por lo que este múltiple de escape estaba un poco excedido de dimensiones, así mismo los ductos de descarga para las válvulas de alivio, tenían interferencia con otros sistemas del automóvil.

El sistema presenta la posibilidad de colocar el turbocompresor en la parte inferior, con las válvulas de alivio en direcciones opuestas, para evitar interferencia, la división de los flujos es efectiva y la geometría del múltiple permite que sea manufacturable gracias al perfil circular que se eligió.

Este modelo fue el primero que se ensambló en el arreglo general del vehículo, en donde se integran todos los sistemas y permite visualizar cuales sistemas están correctos y cuales necesitan alguna modificación.

A continuación se presentan las imágenes del ensamble general en el que se pueden ver los problemas de interferencia por lo que el modelo fue descartado.

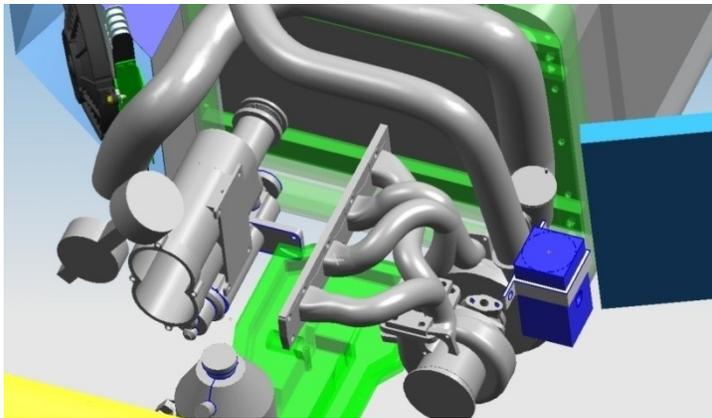


Fig. 48 Ensamble general vista 1

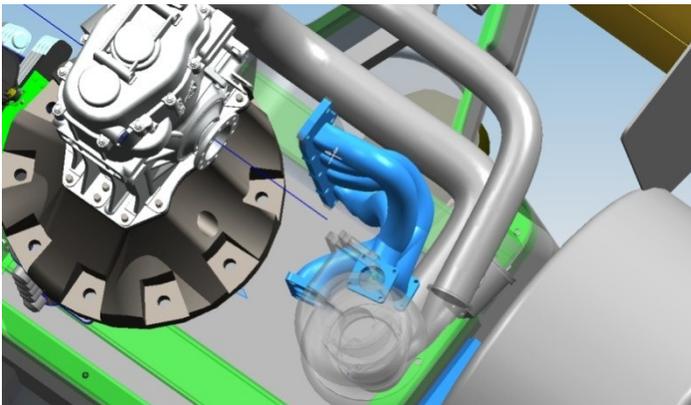


Fig. 49 Ensamble general vista 2

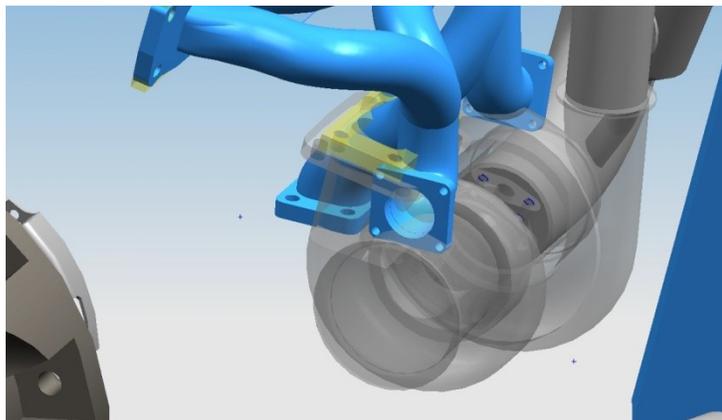


Fig. 50 Ensamble general vista 3

Modelo seleccionado

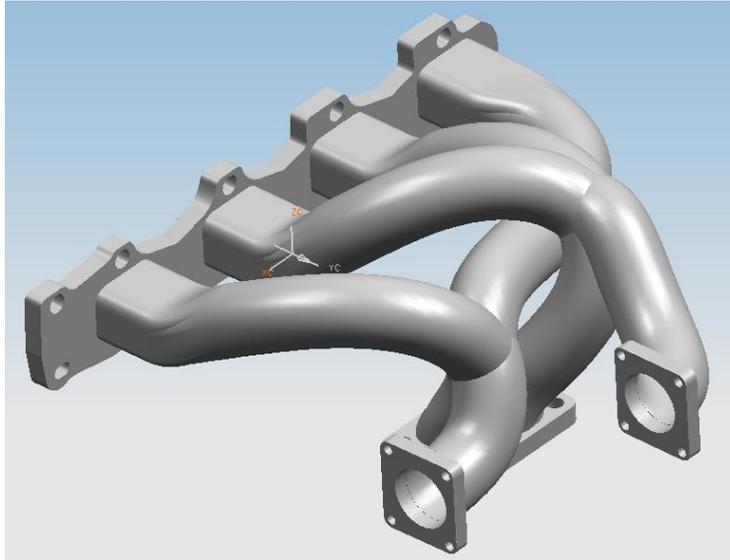


Fig. 51 Modelo final

El modelo GV2, es el modelo que se elige después de hacer los prototipos anteriores, este prototipo ha sido seleccionado ya que cumple con todas las especificaciones de diseño establecidas, tiene las medidas y se adapta correctamente al espacio asignado, los ductos de descarga para las válvulas de alivio están orientadas de una manera sencilla que permitirán que los gases liberados sean desalojados libremente.

La manufactura es realizable, se pretende hacer en partes, con diversos dobleces y después unirlos con soldadura MIG, tal y como son los de competencia.

El ensamble del sistema se hizo junto con las válvulas de alivio con la finalidad de verificar que no interfiera con ningún otro sistema, las imágenes se presentan a continuación.

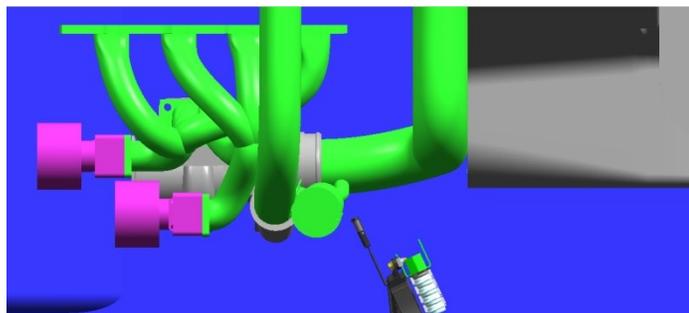


Fig. 52 Ensamble con turbo y las 2 válvulas de alivio vista 1

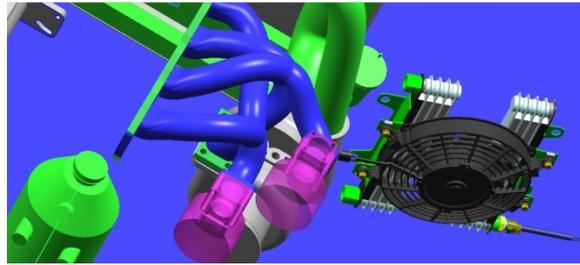


Fig. 53 Ensamble con turbo y las 2 válvulas de alivio vista 2

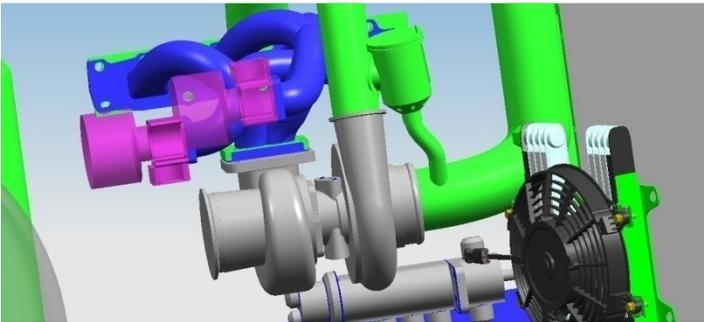


Fig. 54 Ensamble con turbo y las 2 válvulas de alivio vista 3

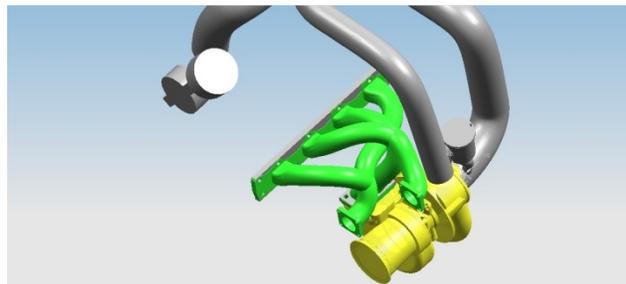


Fig. 55 Ensamble con turbo

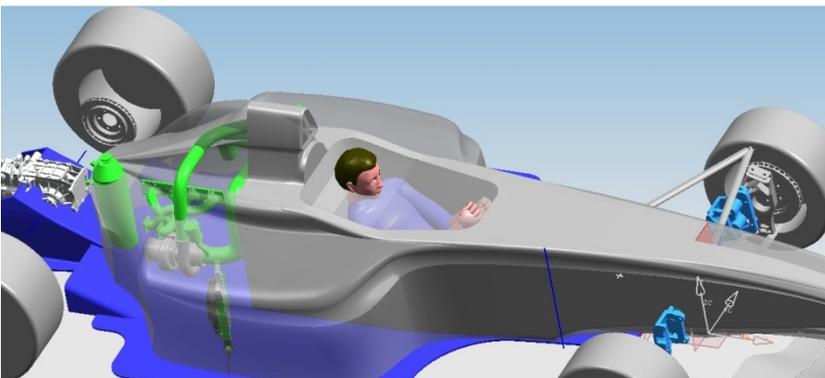


Fig. 56 Ensamble general en el vehículo

CAPITULO 3 ANÁLISIS DEL SISTEMA

3.1 Análisis estructural

Se utilizó el software NX3 en la parte CAE con el módulo de simulación estructural. Este módulo permite realizar simulación dinámica de estructuras mediante el método de elementos finitos, obteniendo resultados tales como, esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, modos de vibración, etc.

El análisis mediante elemento finito es un método numérico muy general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales utilizado en la resolución de diversos problemas ingenieriles.

El método se basa en dividir la estructura (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla.

Los cálculos se realizan sobre una malla creada a partir de generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo, denominadas grados de libertad.

Debido a la dificultad de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Cabe señalar que una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

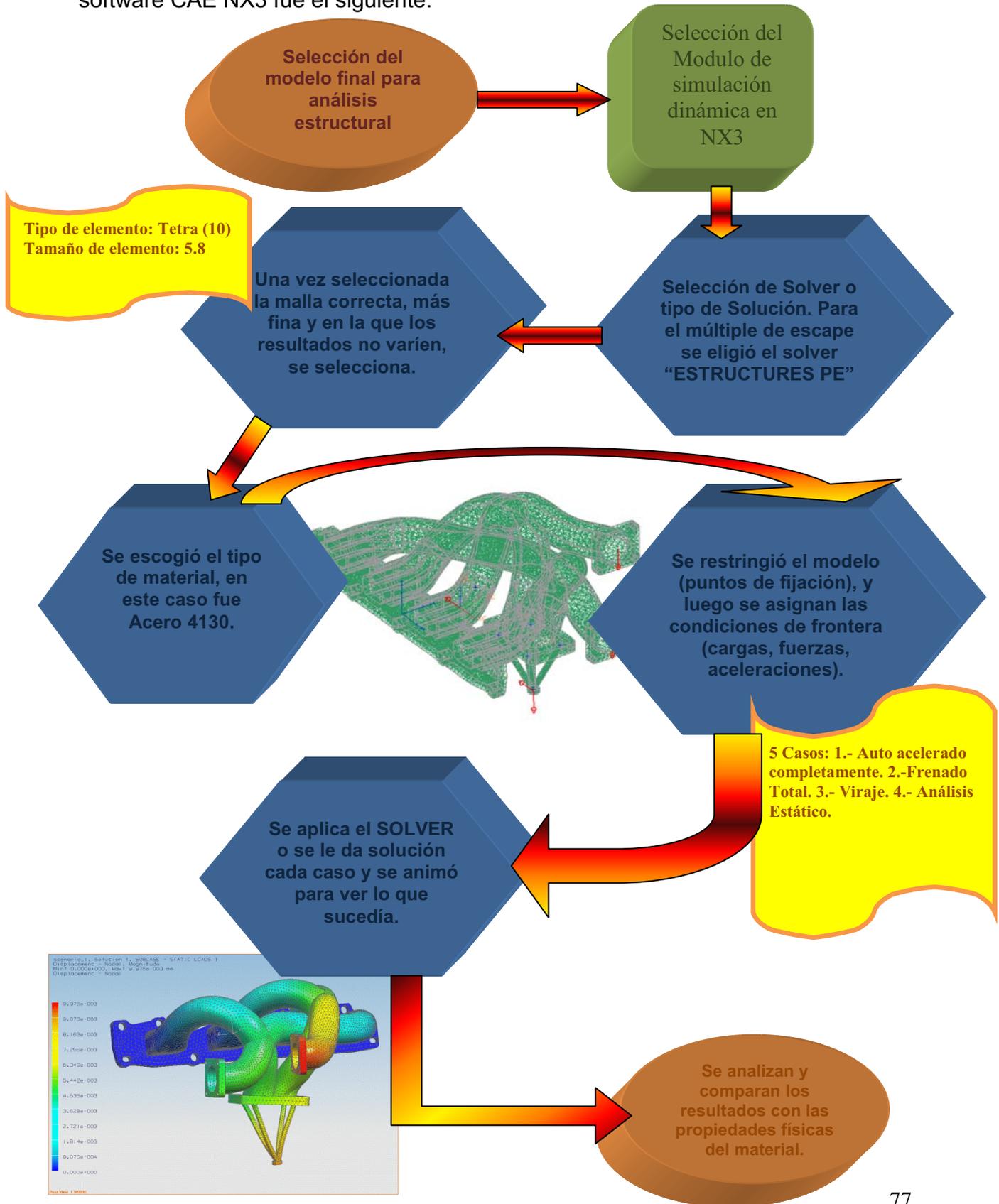
Por esta razón se decidió utilizar el elemento finito **TETRA10 (Diez nodos)** que es la opción más fina a diferencia de la TETRA4 (Cuatro nodos). Escogiendo el tipo de elemento se utilizaron diversos tamaños de elemento finito, se escogió el más pequeño para que la solución convergiera, además de que se compararon las soluciones con diversas mallas verificando que la solución del problema no variara.

El análisis estructural mediante elementos finitos funciona de la siguiente manera: la malla que se genera con ayuda del software está programada para contener el material y las propiedades de la estructura que definen como ésta reaccionará ante ciertas condiciones de carga. A los nodos se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de esfuerzo anticipado en un área. Las regiones que recibirán gran cantidad de esfuerzo tienen normalmente una mayor densidad de nodos que aquellos que experimentan poco o ninguno. Las etapas del análisis mediante elemento finito son: Pre proceso, Cálculo, Postproceso.

Se describen brevemente las etapas de análisis.

- El modelo estructural se divide, mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos durante la etapa de pre proceso.
- Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos (nodos). Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.
- Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada *elemento finito* en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.
- Las funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
- La resolución del sistema anterior permite obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.
- En la etapa de Postproceso se presentan los resultados, generalmente de forma gráfica para su análisis, en el caso del software NX3 se puede animar el modelo con las condiciones que se determinaron al principio.

El procedimiento de análisis estructural mediante elemento finito usando el software CAE NX3 fue el siguiente:



Análisis de resultados estructurales.

A continuación se muestran las imágenes de los análisis de cada una de las condiciones a las que se sometió el múltiple.

ESTATICO

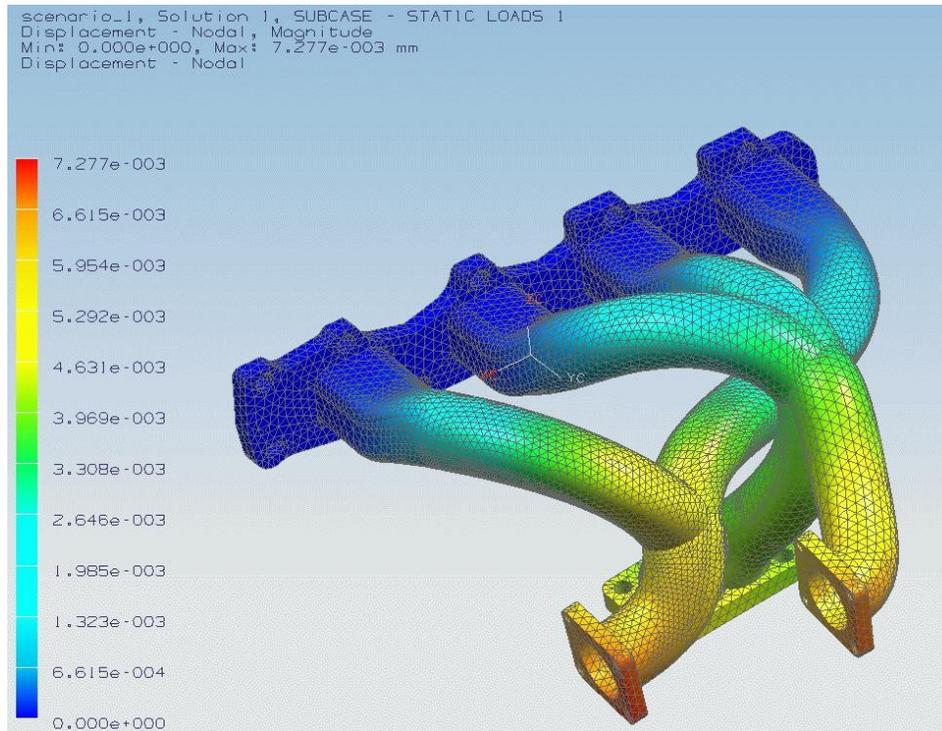


Fig. 57 Desplazamiento estático

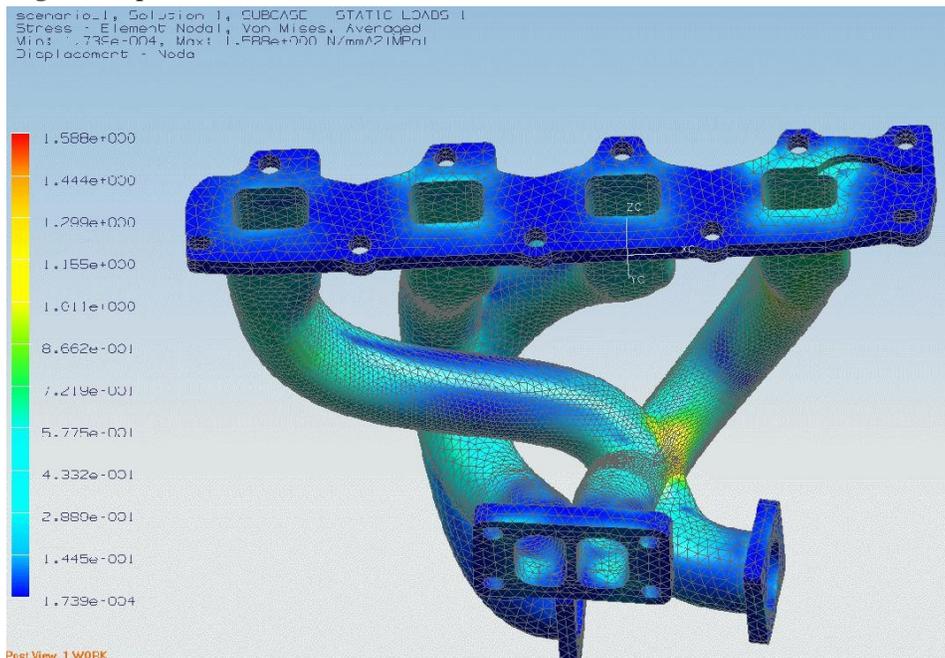


Fig. 58 Esfuerzo estático

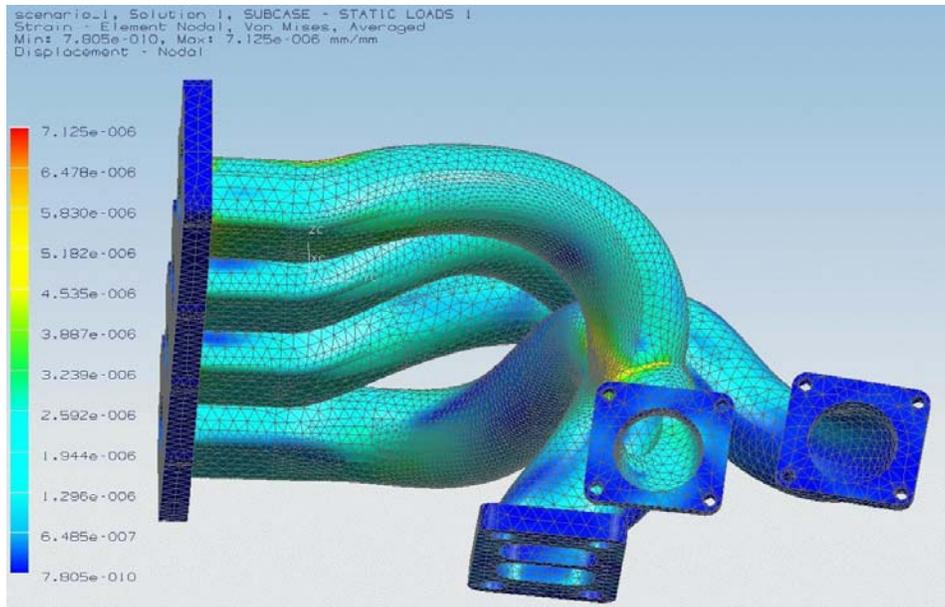


Fig. 59 Deformación estático

ACELERADO

Para las condiciones dinámicas se hace uso de un punto donde se localiza el centro de masa del turbocompresor y las válvulas de alivio en conjunto. Este punto se une al múltiple por medio de tres varillas. El propósito de estos elementos es aplicar la carga del turbocompresor y las válvulas de alivio al múltiple en el lugar correcto.

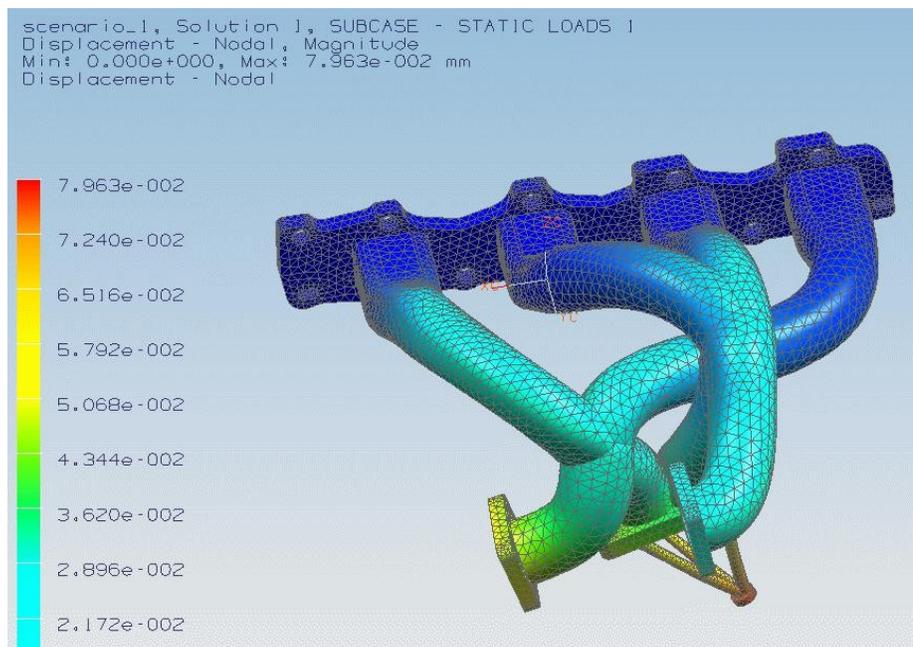


Fig. 60 Desplazamiento acelerado

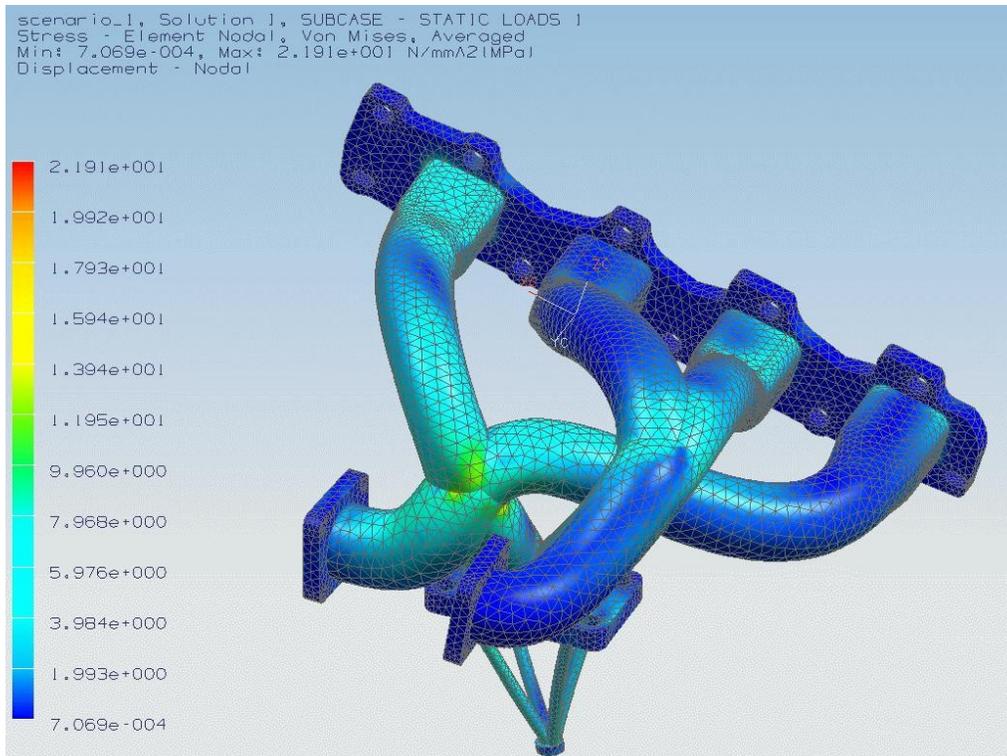


Fig. 61 Esfuerzo acelerado

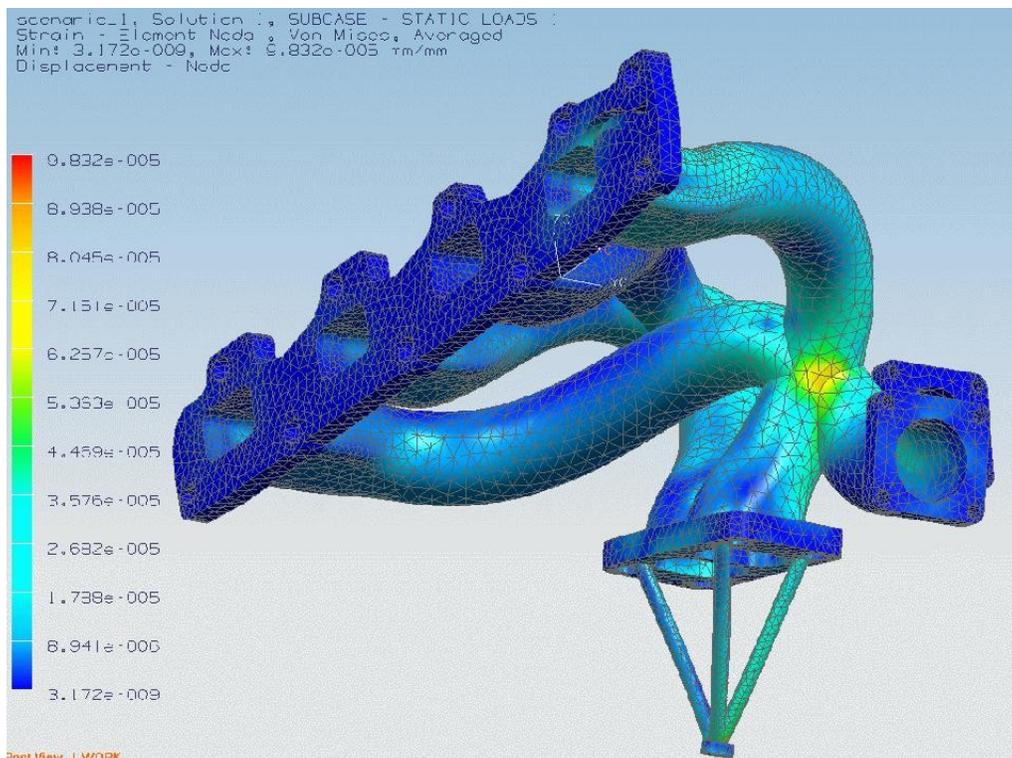


Fig. 62 Deformación acelerado

FRENADO

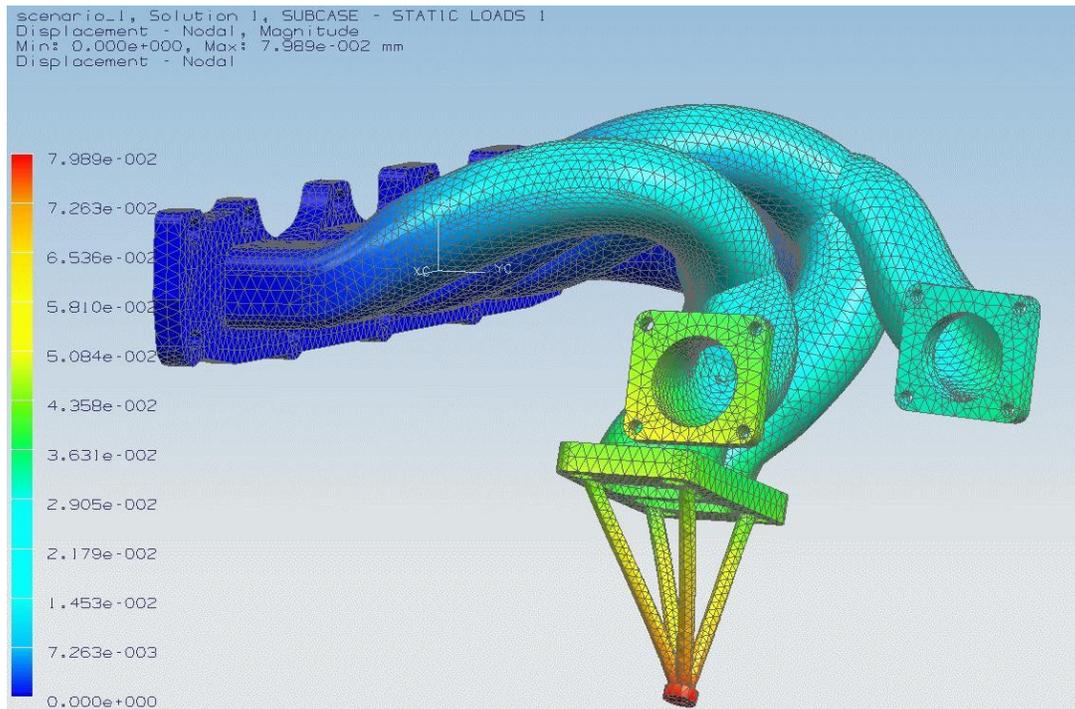


Fig. 63 Desplazamiento frenado

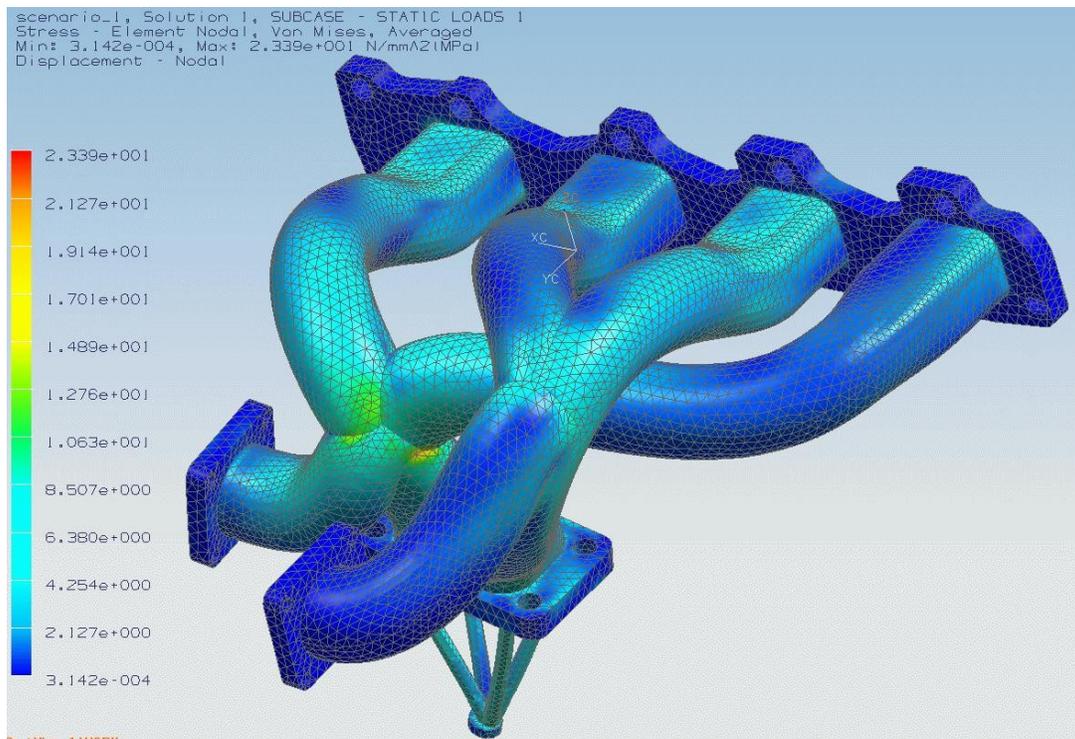


Fig. 64 Esfuerzo frenado

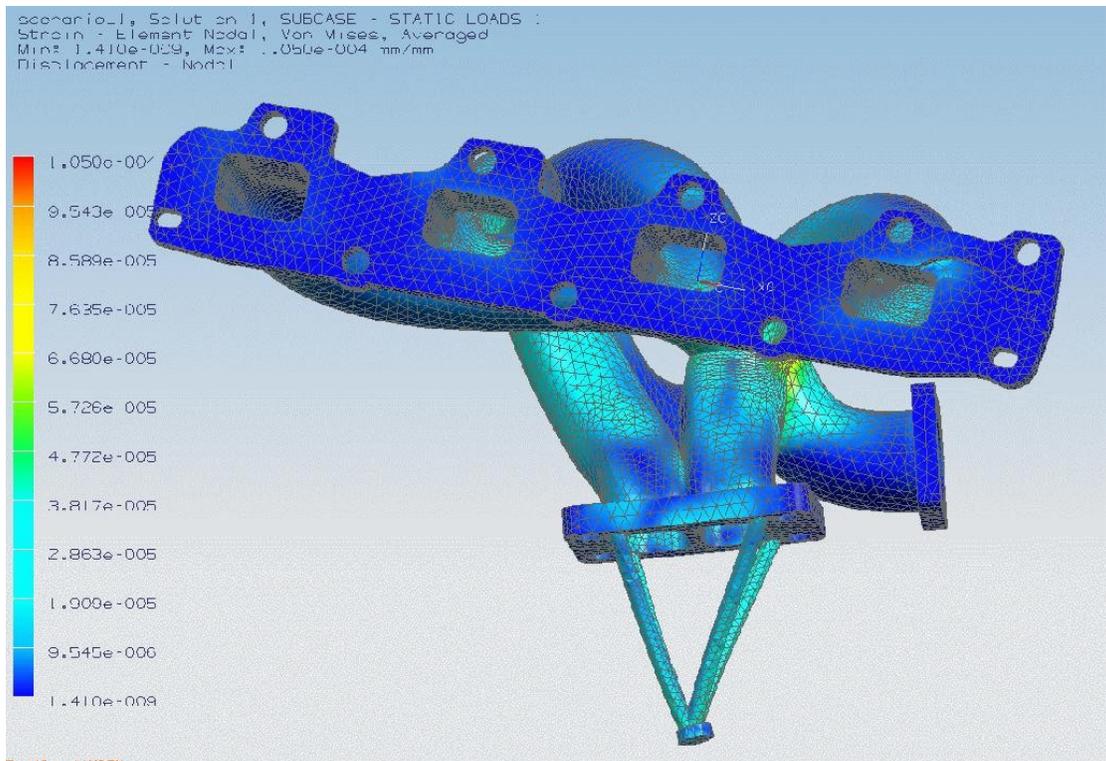


Fig. 65 Deformación frenado

VIRAJE

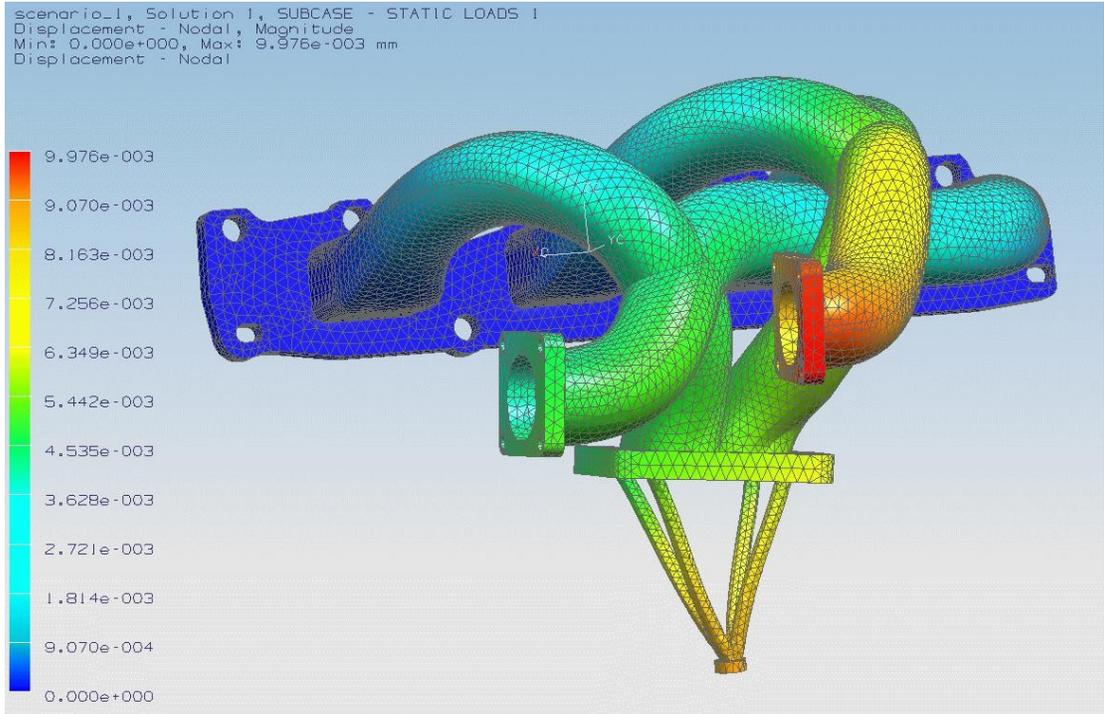


Fig. 66 Desplazamiento viraje

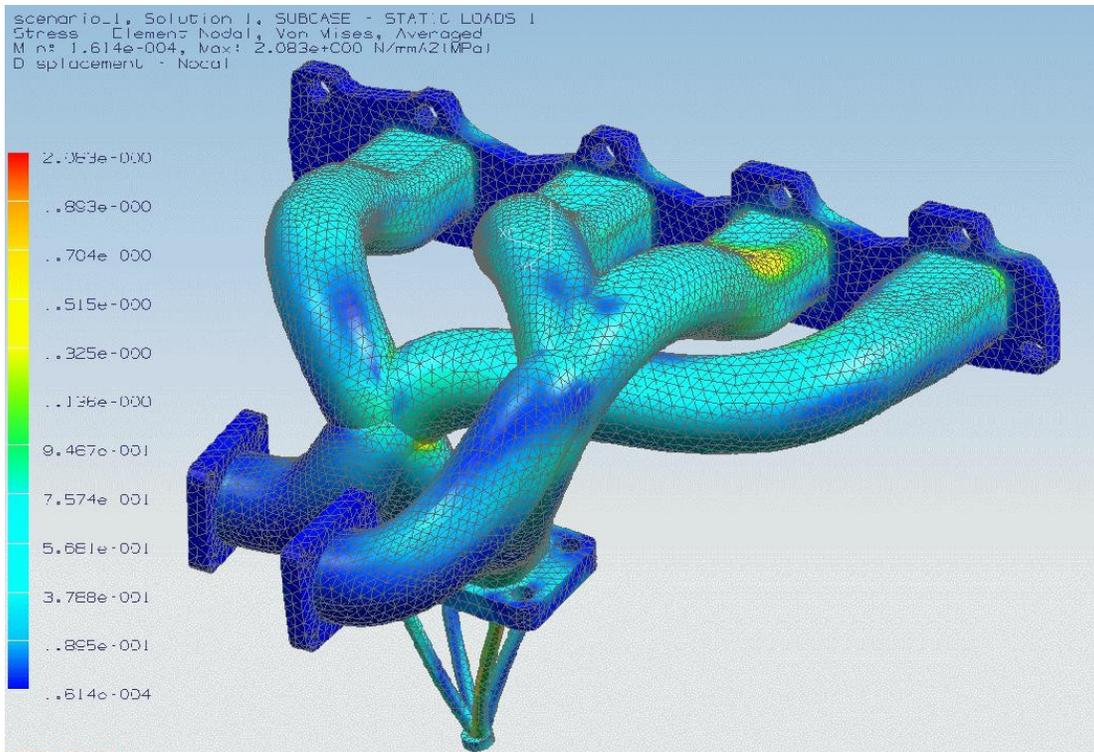


Fig. 68 Esfuerzo viraje

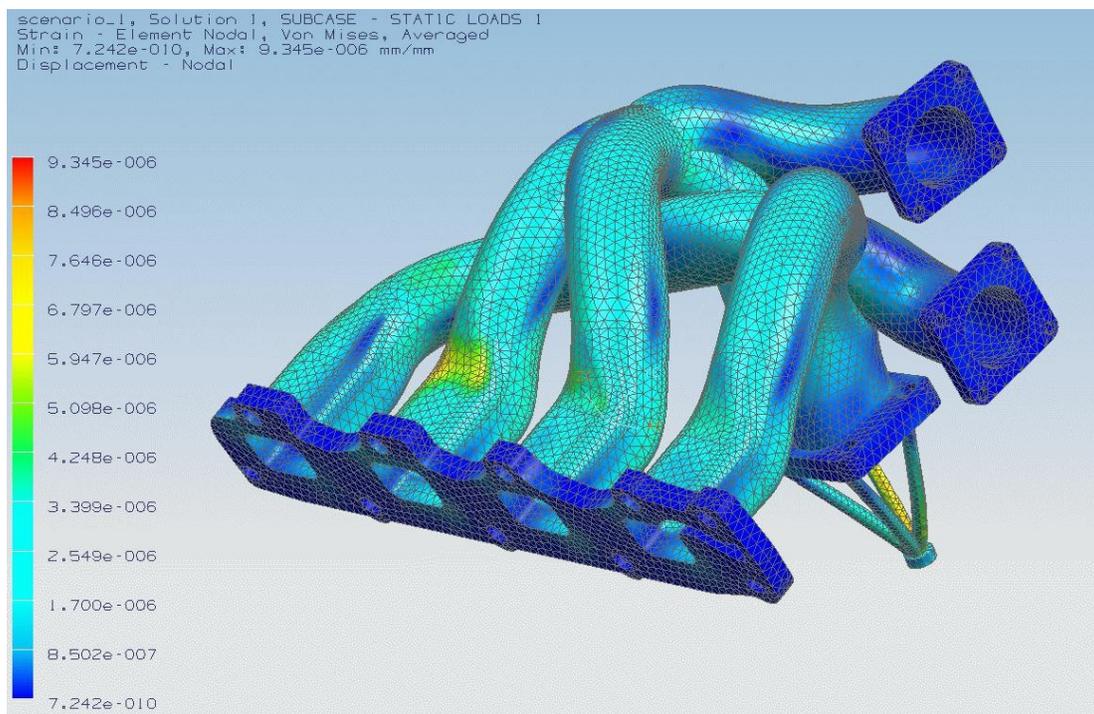


Fig. 67 Deformación viraje

De cada uno de los casos analizados se obtuvieron los siguientes resultados:

Condición	Desplazamiento máx. (mm)	Esfuerzo mín. (MPa)	Esfuerzo máx. (MPa)	Deformación mín. (mm/mm)	Deformación máx. (mm/mm)
Múltiple estático	7.27 e -3	1.73 e -4	1.588	7.80 e -10	7.12 e -6
Auto completamente acelerado	7.963 e-2	7.069 e-4	21.91	3.172 e-9	9.832 e-5
Viraje	9.97 e -3	1.61 e -4	2.083	7.24 e -10	9.34 e -6
Frenado Total	7.98 e -2	3.14 e -4	23.39	1.41 e -9	1.05 e -4

Tabla 6 Resultados del análisis estructural

De esta tabla podemos ver que el esfuerzo máximo que soportará el múltiple es de 23.39 MPa y si el esfuerzo máximo que soporta el Acero 4130 es de 280 ksi ó 1930.5 MPa podemos concluir que el múltiple de escape soportara los esfuerzos incluyendo el peso del sistema del turbocompresor durante las condiciones desempeño que determinamos.

Cálculo de validación para NX Nastran.

Para efectos del tubo tenemos que si lo viéramos de forma frontal tendríamos una vista del tubo como si este fuera un anillo, por lo cual se obtuvo el momento de inercia de este como si estuvieras calculando el momento de inercia de cada circulo que forma el anillo, y al último estuvieras realizando una resta de los mismos. Es por eso que llegamos a la siguiente fórmula:

$$I_o = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{4} \text{ Momento de inercia para un anillo}$$

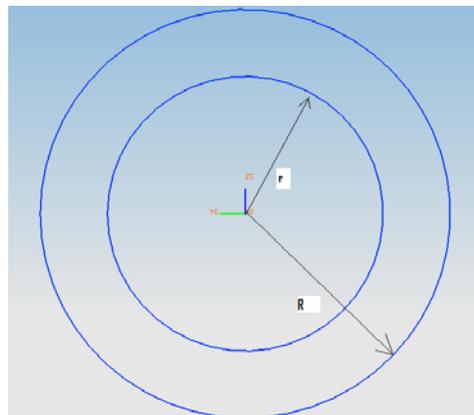


Fig. 69 Sección anular del tubo

Una vez calculado el momento de inercia, para efectos del análisis, lo consideramos al tubo como un tubo empotrado en cantiléver, cargado con una fuerza de 50Kg hacia abajo (debido a la forma del múltiple de escape que se analiza), como se muestra en la sig. Figura:

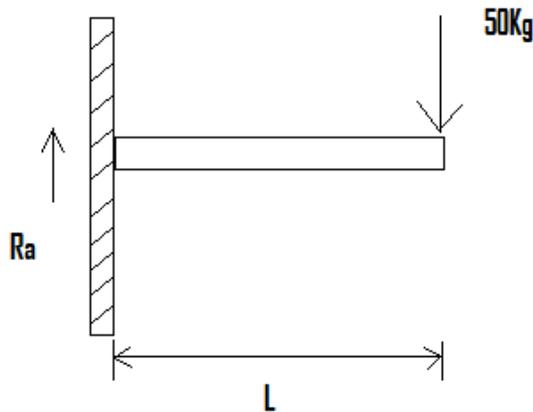


Fig. 70 Diagrama de fuerzas

Por lo tanto al tener este sistema una gran similitud con una barra empotrada en cantiléver, podemos aplicar las ecuaciones para la misma, únicamente cambio el momento de inercia. Estas ecuaciones, son las siguientes:

$$\theta = \frac{pL^2}{2EI} \text{ Pendiente en el extremo}$$

$$M = -PL \text{ Momento máximo}$$

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \text{ Deflexión máxima}$$

Usando las formulas anteriores y el momento de inercia para un anillo, tenemos entonces que:

$$L = 0.2 \text{ m}$$

$$E = 20.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \text{ para el acero}$$

$$R = 2.225 \text{ cm}$$

$$r = 2 \text{ cm}$$

$$\theta = \frac{50Kg(.2m^2)}{2\left(\frac{20.6x10^{10}N}{m^2}\right)(65.96341x10^{-9}m^4)} = 7.35918433x10^{-5}$$

$$M=50(.2m)$$

$$M=10kgm$$

$$\delta = \frac{50Kg(.2m^3)}{3\left(\frac{20.6x10^{10}N}{m^2}\right)(65.96341x10^{-9}m^4)} = 9.8122x10^{-6} \quad \text{mm}$$

3.2 Análisis de flujo

Análisis CFD

La dinámica de fluidos computacionales (CFD, por sus siglas en inglés), es una de las ramas de la mecánica de fluidos la cual utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujo de fluidos. Las computadoras son utilizadas para computar los millones de cálculos que se requieren para simular la interacción de fluidos y gases con superficies complejas que se utilizan en ingeniería.

Sin embargo, aunque se utilicen ecuaciones simplificadas y súper computadoras solo se pueden alcanzar soluciones aproximadas en la mayoría de los casos. Es por esta razón que los modelos establecidos en los software de CFD deben de ser comprobados en pruebas de campo.

Las bases de cualquier problema de CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales definen cualquier flujo de fluido de una sola fase. Estas ecuaciones pueden ser simplificadas al remover los términos que describen la viscosidad para convertirse en ecuaciones de Euler. Una simplificación posterior, se haría al remover los términos que describen la vorticidad lo que nos llevaría a las ecuaciones de full potencial. Finalmente, estas ecuaciones pueden ser linealizadas para dar pie a las ecuaciones de potencia linealizadas.

La mayor consideración en CFD es como se realizara la discretización del fluido continuo en una computadora. Un método es el de discretizar el dominio espacial en pequeñas celdas para formar un volumen en una malla o rejilla, y entonces aplicar un algoritmo para resolverá las ecuaciones de movimiento (ecuaciones de Euler para fluido no viscoso y de Navier-Stokes para fluido viscoso). Adicionalmente como una malla también puede ser irregular o regular las características distintivas de cada tipo de malla es que cada celda deberá de ser separada y almacenada en un espacio aislado de la memoria. En donde existen

discontinuidades hay que aplicar mallas con mayores resolución tales como una malla de variación decreciente, flujo transportado correctamente (FCT), esencialidad no oscilatoria (ENO), las cuales evitaran el fenómeno de gibbs en la solución.

Es posible resolver directamente el problema con las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos laminares y para flujos turbulentos en donde el tamaño del elemento más relevante del modelo pueden ser resueltas por la malla. En general de cualquier manera el rango del tamaño del elemento puede variar para cada problema, todo depende de la cantidad de computadoras que se puedan conectar en paralelo para resolver el modelo. En estos casos, la simulación de flujos turbulentos requiere que se introduzca un modelo de turbulencia. Las ecuaciones de Eddy y las RANS (Reynolds-averaged-Navier-Stokes equations) en conjunto con un modelo $k-\epsilon$ o un método de esfuerzos de Reynolds son dos técnicas para tratar la solución de los elementos.

En algunos casos, otras ecuaciones pueden ser resueltas simultáneamente con las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones pueden incluir la descripción del comportamiento de casos de transferencia de masa, reacciones químicas, transferencia de calor, etc.

Metodología

En todas estas aproximaciones se sigue básicamente el mismo procedimiento.

Pre proceso

- La geometría (fronteras físicas) del modelo definen el problema.
- El volumen ocupado por el fluido es dividido en células separadas (la malla). La malla puede ser uniforme o no uniforme.

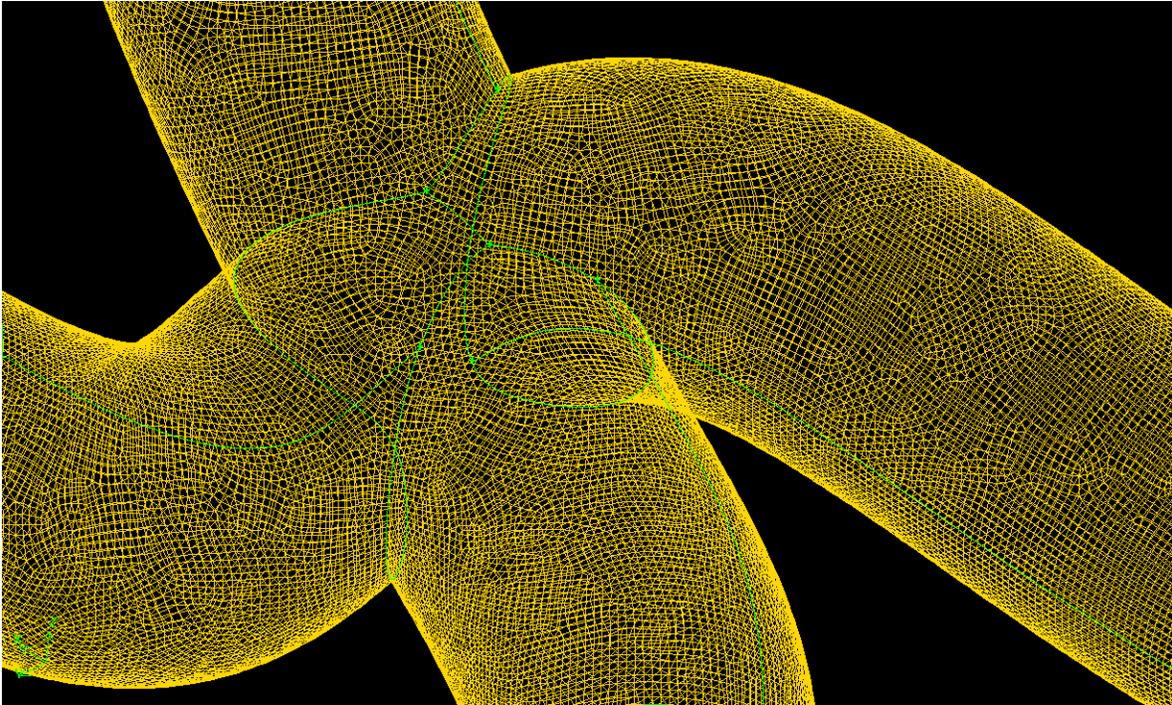


Fig. 71 Malla

- El modelo físico ahora está definido.

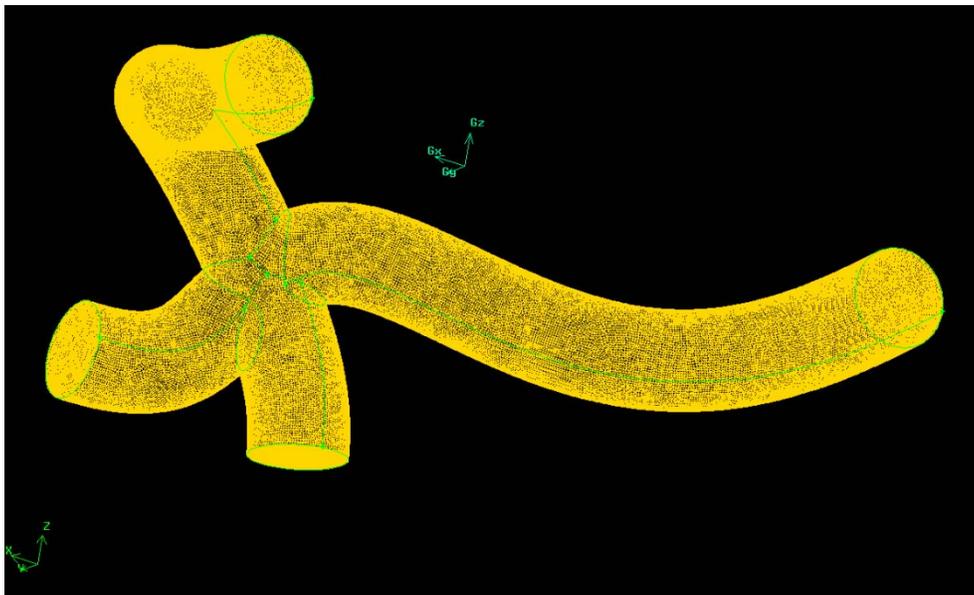


Fig. 72 Modelo físico definido

- Las condiciones de frontera se definen, estas involucran específicamente el comportamiento del fluido y las propiedades en las fronteras del problema. Para problemas trascendentes las condiciones iniciales deben también quedar definidas.

El inicio de la simulación y las ecuaciones son iterados como un estado estacionario o trascendental.

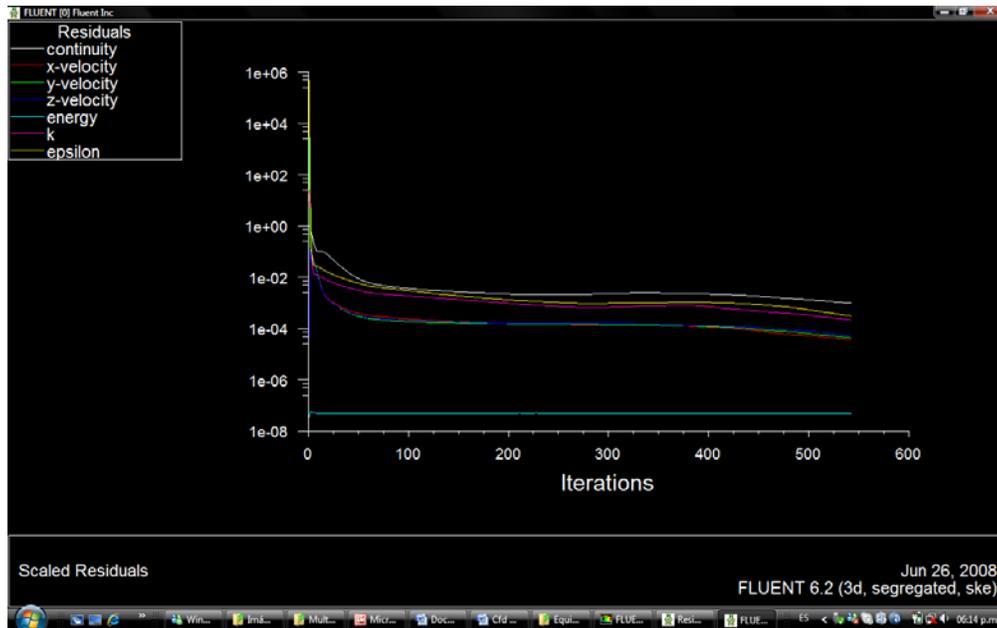


Fig. 73 Grafica de convergencia

Finalmente, un post procesador es utilizado para el análisis y la visualización de la solución resultante.

Análisis de velocidades

Durante el estudio del sistema de escape se realizó el análisis de las velocidades que se desarrollaron en el sistema, se utilizó un fluido viscoso para lograr que la velocidad en las paredes del ducto fueran igual a cero y poder visualizar el gradiente de velocidad.

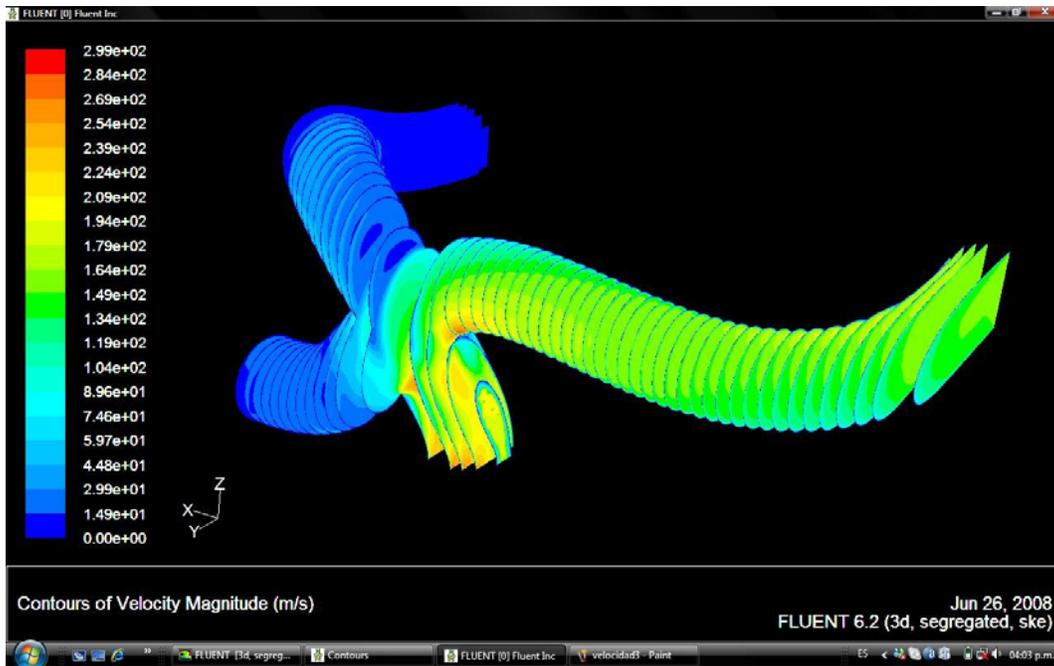


Fig. 74 Visualización de velocidades en los ductos 1 y 4

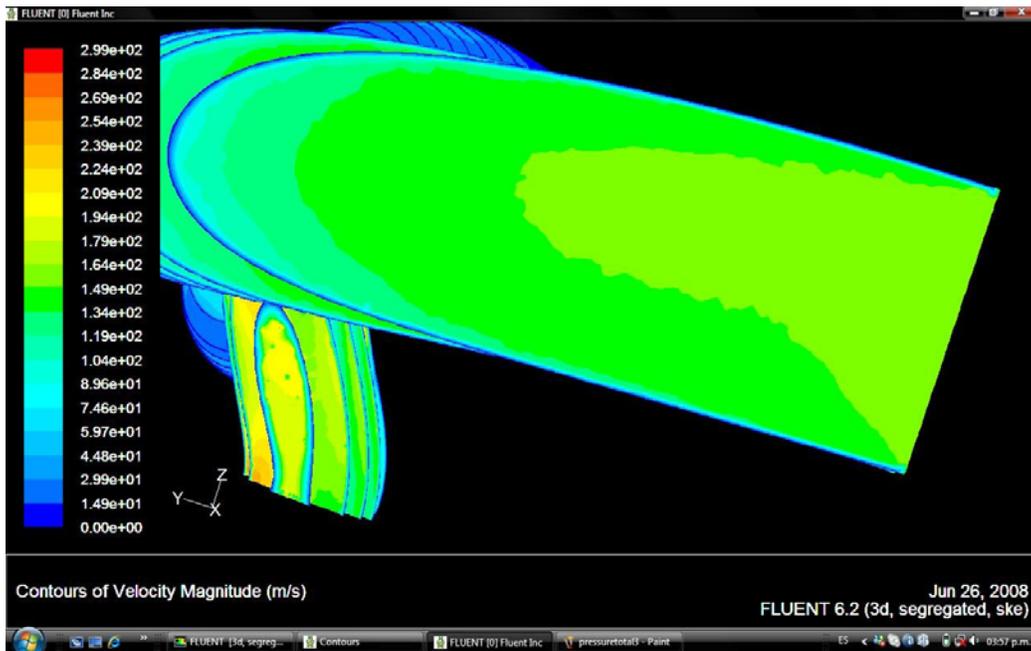


Fig. 75 Gradiente de velocidad en el ducto

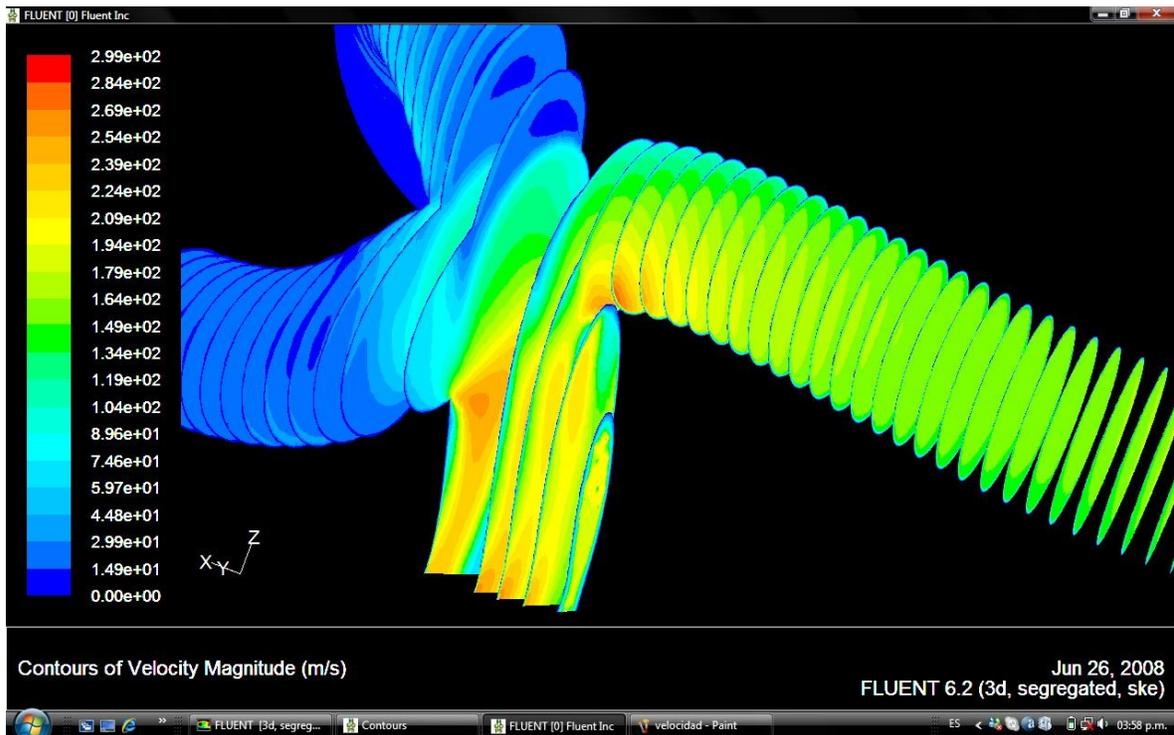


Fig. 76 Velocidad en la intersección de los ductos

Análisis de presión

El análisis de presión permite visualizar el comportamiento de la presión del fluido en la geometría del sistema, se analizó la presión en los puntos críticos en donde se observa una caída de presión en las curvas internas del ducto.

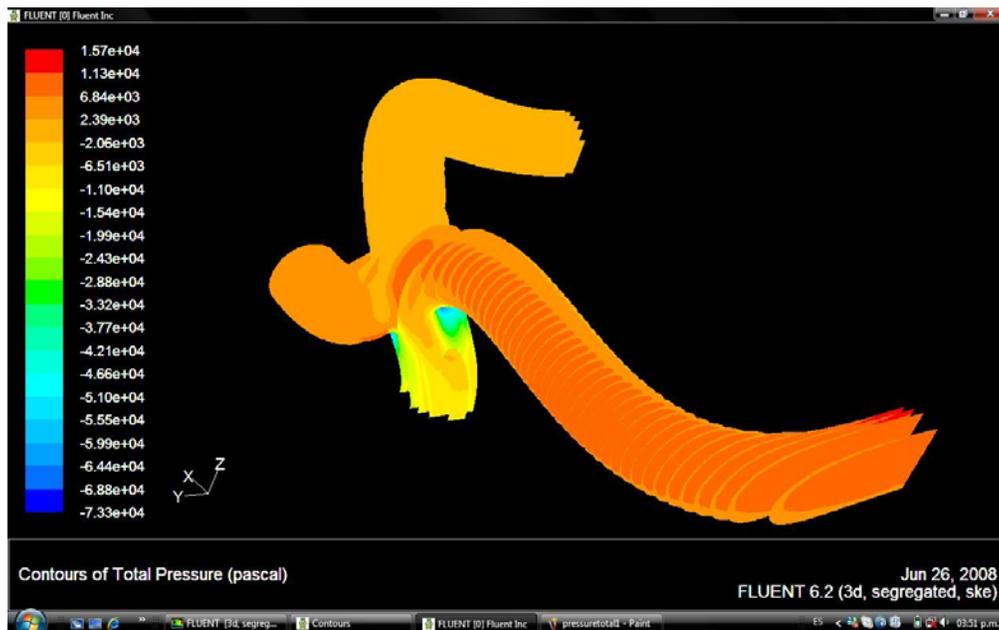


Fig. 77 Presión total en los ductos 1 y 4

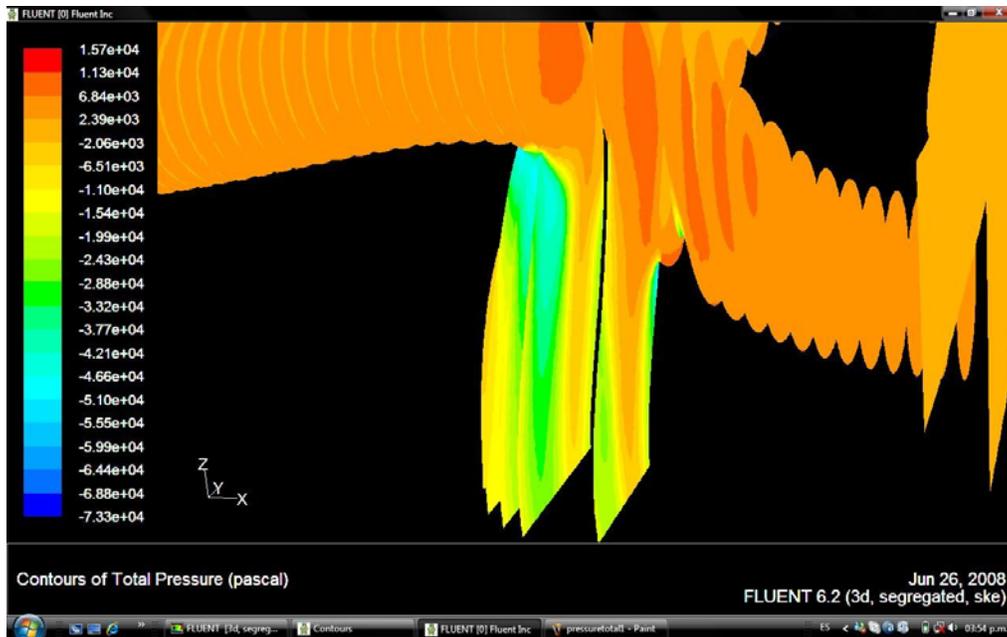


Fig. 78 Presión en la sección crítica de los ductos 1 y 4

Análisis de temperaturas

La temperatura de entrada en el múltiple fue tomada de lecturas reales, que nos arrojaron una temperatura de 873 kelvin, al analizar el múltiple observamos que se mantenía constante en toda la geometría, sin embargo logramos visualizar la distribución de temperatura en el punto en el que entra el fluido caliente, que sería la máxima.

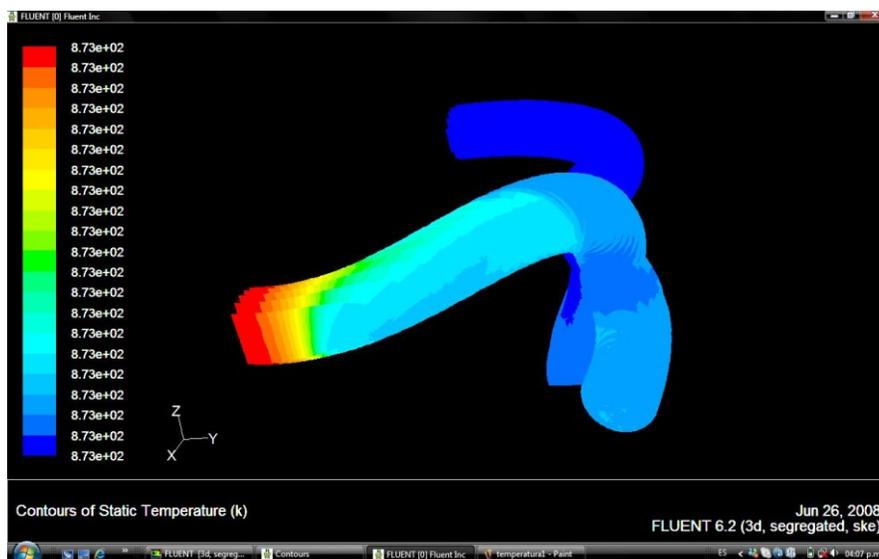


Fig. 79 Distribución de temperatura en los ductos

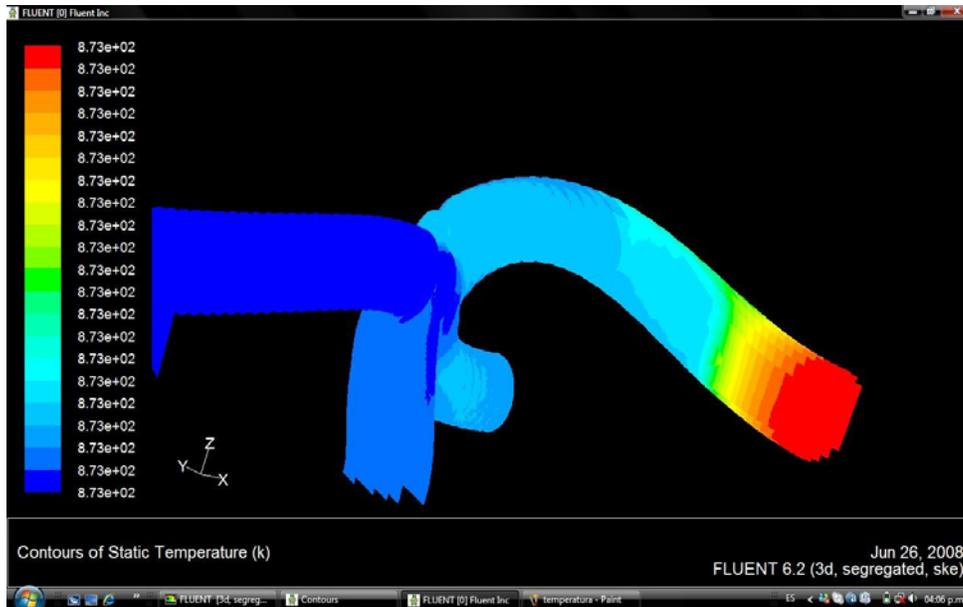


Fig. 80 Distribución de temperatura en los tubos 1 y 4

Condición	Máxima	Ubicación	Mínima	Ubicación
Velocidad	284 m/s	Curvas internas de la geometría del ducto, intersección con el ducto de la válvula de alivio	0 m/s	Paredes de los ductos, entrada de la válvula que esta cerrada
Presión	15700 Pa	Entrada del ducto en la válvula que se encuentra abierta liberando gases de combustión.	-7330 Pa	Curva que se localiza en el ducto que está activo justo antes de la intersección con el ducto inactivo y la bifurcación de la válvula de alivio
Temperatura	873 k	Entrada del ducto activo liberando gases de combustión	873 k	La temperatura se hace constante en todo el sistema teniendo una pérdida muy pequeña de temperatura, por lo que se puede considerar como que es la misma de la entrada

CAPITULO 4 PROCESO DE MANUFACTURA

4.1 Selección del proceso de manufactura

Como se ha mencionado antes, no se pretende fabricar este sistema por medio de fundición, lo cual es muy común para una producción en serie y para diseños poco complejos como los que incluyen los vehículos originalmente.

Este sistema de escape es un prototipo, por lo que sólo se va a construir un ejemplar o dos y por lo tanto no es viable fabricarlo por medio de fundición dado que el gasto del molde para este proceso es muy alto y no se recuperaría con solo dos modelos.

Tomando lo anterior como referencia, se ha optado por una construcción a base de placas y tubos de acero unidos por medio de soldadura MIG.

4.2 Creación del prototipo rápido

El motivo del uso del prototipo rápido en este proyecto es la ayuda en la construcción del múltiple, esto es debido a la complejidad y rareza del diseño.

Se le llama prototipo rápido al modelo en un material que no es el propio del prototipo funcional.

Para la realización del prototipo rápido de este proyecto se contó con el apoyo de la Incubadora de Empresas de Base Tecnológica del Instituto Politécnico Nacional, la cual cuenta con una maquina generadora de prototipos rápidos.

Esta máquina tiene la capacidad de imprimir en un volumen de 20x20x20 cm por lo cual se tuvo que seccionar el diseño del múltiple completo en seis partes para después pegarlas y tener un modelo en escala real.



Fig. 81 Maquina generadora de prototipos rapidos

El proceso de impresión del prototipo es el siguiente:

Primero se secciona el modelo en las partes necesarias para que quepa en el volumen de impresión.

Estas partes del modelo se deben exportar a las extensiones *.stl o *.3dm que son las que reconoce el programa de la maquina.

Ahora, estos archivos se abren con el software de la impresora y se acomodan de tal manera que quepan la mayoría en la sección de impresión, se verifica que la maquina tenga los consumibles suficientes y se manda a imprimir.

En la maquina se tienen dos depósitos adyacentes: uno donde está el sulfato de calcio, que es el material base del modelo, y en el otro es donde se va depositando el aglutinante para formar la impresión del modelo.

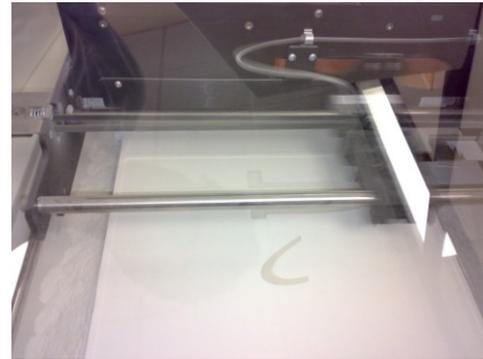


Fig. 82 Cabezal de impresión de la máquina



Fig. 83 Área de impresión

Este proceso se realiza por capas, es decir, la maquina reconoce la sección de impresión y la divide en cortes horizontales.

Estas secciones horizontales son las que se van imprimiendo cada vez que el cabezal de impresión deposita el aglutinante en la sección de impresión para después hacer un barrido de sulfato de calcio sobre este.

Este proceso puede tardar alrededor de 5 horas más una de secado.

Después se procede a retirar el sulfato de calcio sobrante en la sección de impresión para sacar las partes del modelo impreso.



Fig. 85 Sacar las piezas del contenedor



Fig. 84 Piezas retiradas del contenedor

Ya que están las piezas afuera se limpian para quitar el excedente y después se procede a pegarlas con cianocrilato para tener el modelo completo.



Fig. 87 Limpieza de piezas



Fig. 86 Pegado de piezas con cianocrilato

Cuando se tiene el modelo completo se aplica una capa de cianocrilato en la superficie para sellar los poros y evitar que se desgaste.



Fig. 88
Aplicación
de
cianocrilato
en la
superficie
del modelo

Ahora se tiene el modelo completo y listo para manejarse



Fig. 89 Modelo terminado vista inferior

Fig. 90 Modelo terminado vista lateral

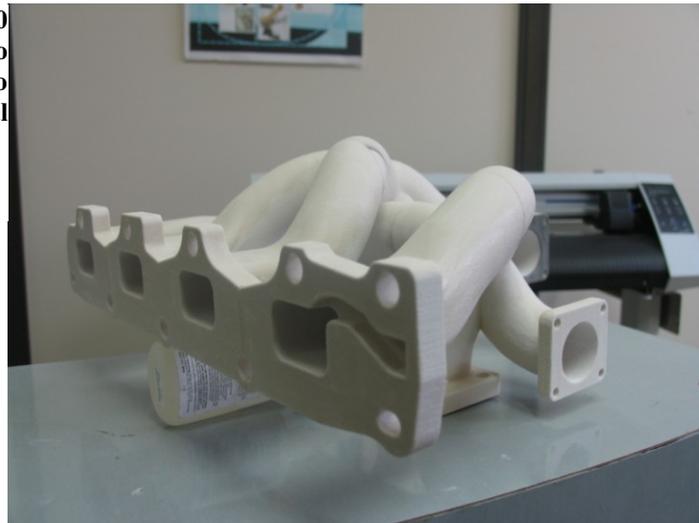


Fig. 91 Modelo terminado vista superior

4.3 Manufactura

Para poder fabricar este prototipo contamos con el apoyo de HG Performance Exhaust⁶ y fue en sus instalaciones donde se llevó a cabo todo el proceso.

El primer paso para la manufactura es la construcción de un escantillón para múltiple de escape.

Para construir este escantillón se va a utilizar el modelo de prototipo rápido para obtener las posiciones de las bridas, de las guías de las curvaturas, de los barrenos, etc.

Primero se deben cortar las bridas para el escantillón y para el prototipo. Esto se hace por medio de un pantógrafo y la cortadora de plasma. Y también se hacen los barrenos de cada una con un taladro.

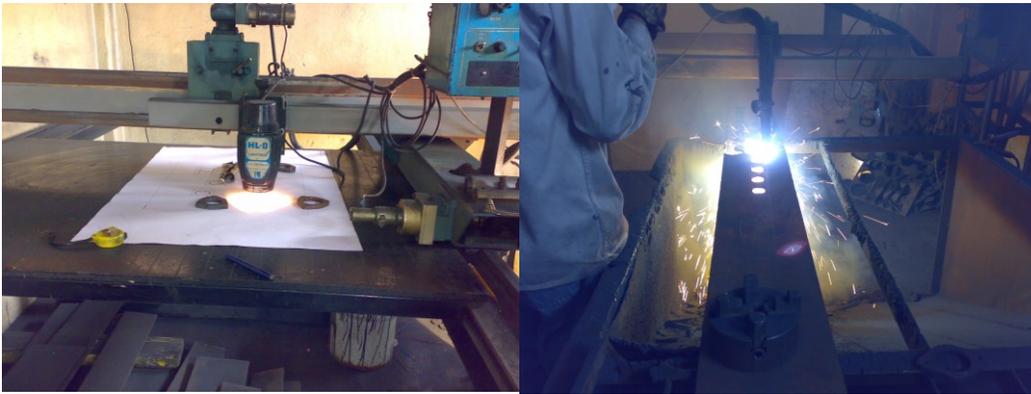


Fig. 92 Corte con pantógrafo



Fig. 93 Bridas cortadas

⁶ Empresa mexicana dedicada a la manufactura y mantenimiento de sistemas de escape.

Ahora se arma el escantillón soldando las bridas en la posición correcta con la ayuda de soleras y medios tubos para hacer las guías.



Fig. 94 Construcción del escantillón



Fig. 95 Escantillón construido

Ahora que tenemos el escantillón listo, se obtienen las curvaturas de los tubos del múltiple por medio de alambres. Con estos y la maquina dobladora de tubos se procede a obtener cada uno de los tubos.



Fig. 96 Doblado de los tubos a partir de alambres curvados



Fig. 97 Tubos doblados

Ya con los tubos cortados y doblados se hace un montaje en el escantillón para determinar que partes de cada tubo se deben cortar con el fin de que ensamblen perfectamente unos con otros y las con bridas.



Fig. 98 Ajuste de los tubos doblados en el escantillón

Ahora que todos los tubos embonan bien se sueldan junto con las bridas.



Fig. 99 Soldado de tubos primera parte

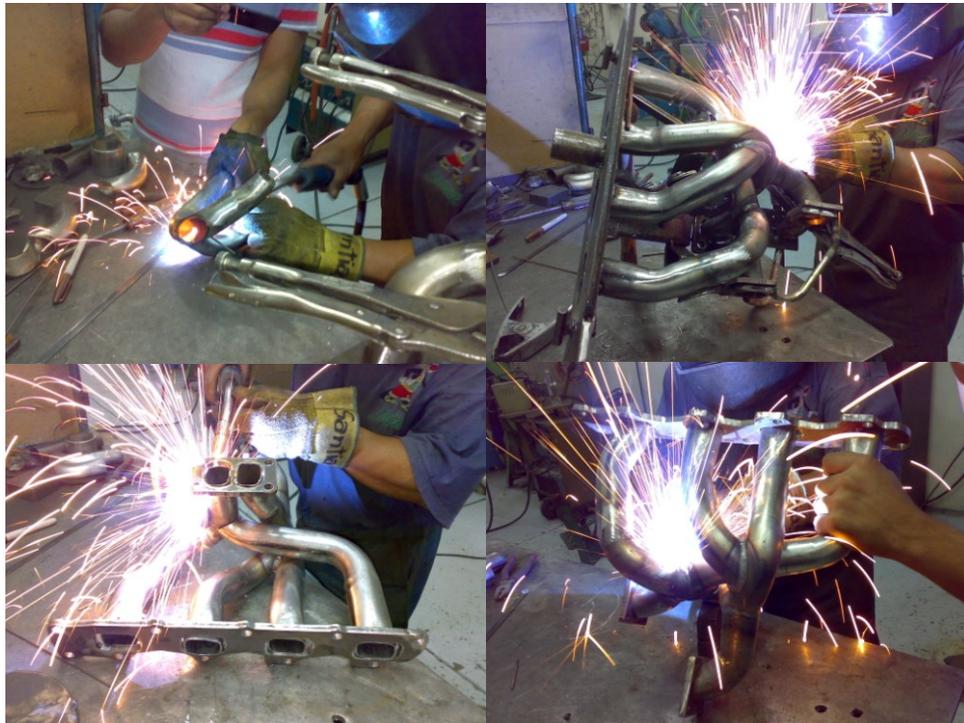


Fig. 100 Soldado de tubos segunda parte

Posteriormente se ajustan los tubos en los puertos de las bridas



Fig. 101 Ajuste de los tubos en los puertos de las bridas

Ahora se sueldan todos los puertos para sellarlos perfectamente y se rectifican.



Fig. 102 Sellado de los puertos mediante soldadura

Después se rectifican todas las bridas en la lija para que queden parejas. Y se realiza una prueba de sellado por medio de aire.



**Fig. 103
Rectificación de las
bridas**



**Fig. 104
Prueba de
sellado**



Fig. 106 Comparación del prototipo rápido y el múltiple de metal



Fig. 105 Múltiple de metal



Fig. 107 Prototipo rápido, múltiple para turbo y múltiple original

CAPITULO 5 PLAN DE ENSAMBLE DEL SISTEMA Y FIN DE VIDA

Es importante mencionar que el ensamble del sistema de escape en el motor solo es de manera virtual, debido a que no se cuenta físicamente con el motor, el turbocompresor ni las válvulas de alivio.

Este plan de ensamble se hace por medio del software Unigraphics NX4 ya que en este programa se han venido haciendo todos los modelos de los múltiples y además se cuenta con el modelo del turbocompresor, las válvulas de alivio, y el motor.

Un plan de ensamble es útil para tener en cuenta cada uno de los elementos que conforman todo el sistema como son el motor, múltiple, turbocompresor, válvulas de alivio, juntas, cada uno de los tornillos, etc. También sirve para saber en qué posición va cada componente y con esto verificar que no existan interferencias entre ellos.

Otro punto que se debe verificar es que se puedan montar los componentes y que se puedan sujetar correctamente con sus respectivos tornillos, tuercas o el que se a su medio de sujeción.

A continuación se muestra una lista con la tornillería que se va a utilizar para el montaje de todos los componentes que intervienen en el sistema de escape.

POSICION DEL TORNILLO	DIAMETRO (in)	LONGITUD (in)	CANTIDAD	TUERCA	RONDANA
Cabeza a múltiple (integrados en el motor)	1/2	1 1/4	10	Si	No
Múltiple de escape al turbocompresor	7/16	1 1/2	4	Si	Si
Múltiple de escape a válvulas de alivio	1/4	2 1/2	8	Si	Si
Válvulas de alivio a tubo de escape	1/4	1 1/4	8	Si	Si
Turbina a tubo de escape	5/16	1	4	No	Si

Tabla 7 Tornillería para la instalación del sistema de escape. El par de apriete de los tornillos debe ser de 30 N-m

Los tornillos que se utilizaran son cuerda derecha y de rosca estándar, es de suma importancia que el apriete de las las tuercas que sujetan al múltiple de escape con la cabeza del motor tengan un par de apriete de 30 N-m, con un orden de apriete en cruz, esto quiere decir que se aprieta del centro a los extremos, primero el tornillo del lado izquierdo arriba y después el del lado derecho abajo, posteriormente el del lado derecho arriba y el lado izquierdo abajo y se debe de seguir esa secuencia hasta terminar con todos los tornillos en la cabeza.

Cabe mencionar que deben existir juntas entre cada unión en el sistema, es decir, entre motor y múltiple, entre múltiple, turbocompresor y válvulas de alivio y entre turbocompresor, válvulas de alivio y tubos de escape.

Ahora se muestran las imágenes donde se observa la interacción entre el motor y todos los componentes del sistema.

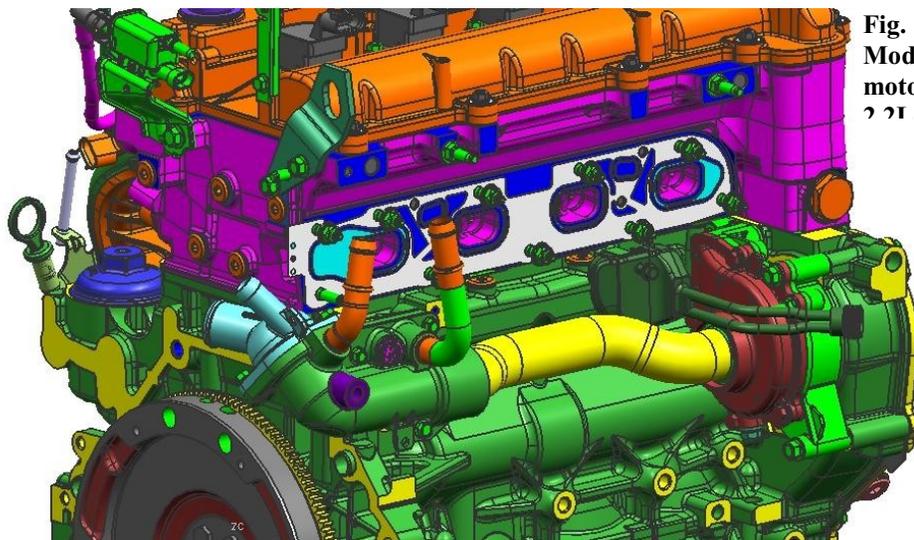


Fig. 108
Modelo del
motor Ecotec
2 21

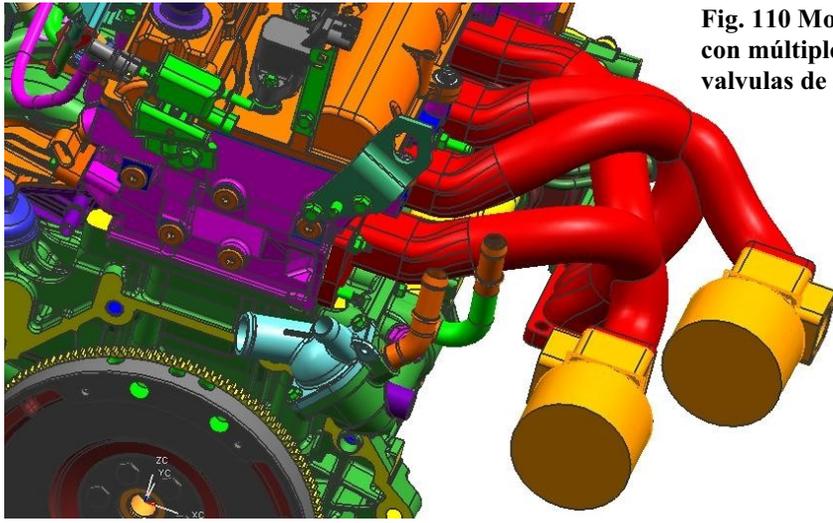


Fig. 110 Motor con múltiple y valvulas de alivio

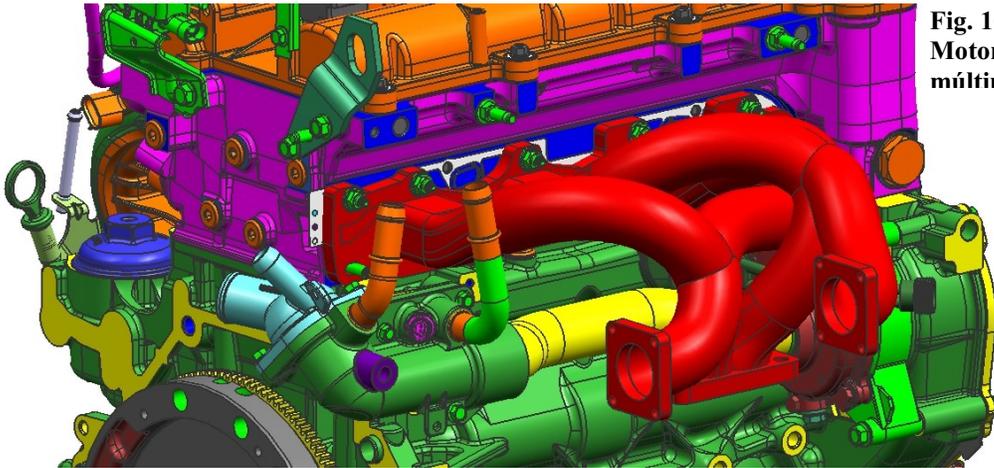


Fig. 109 Motor con múltiple

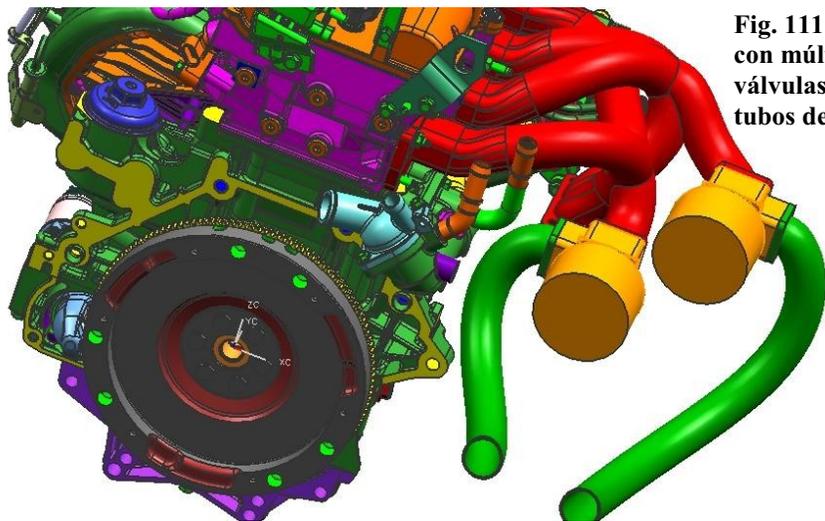


Fig. 111 Motor con múltiple, válvulas y sus tubos de escape

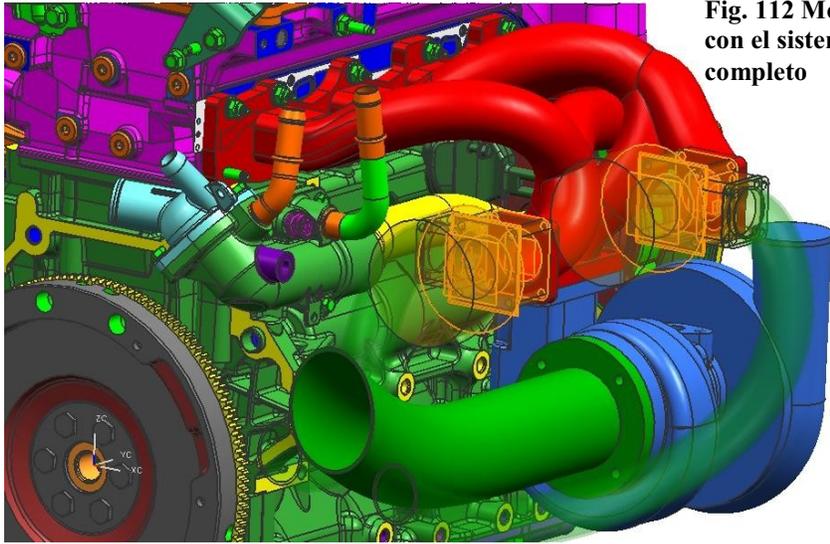


Fig. 112 Motor con el sistema completo

En las siguientes figuras se puede observar que el múltiple no pega con el motor ni con otro componente. Las válvulas de alivio quedan suficientemente separadas y sus tubos de escape no tocan otro componente.

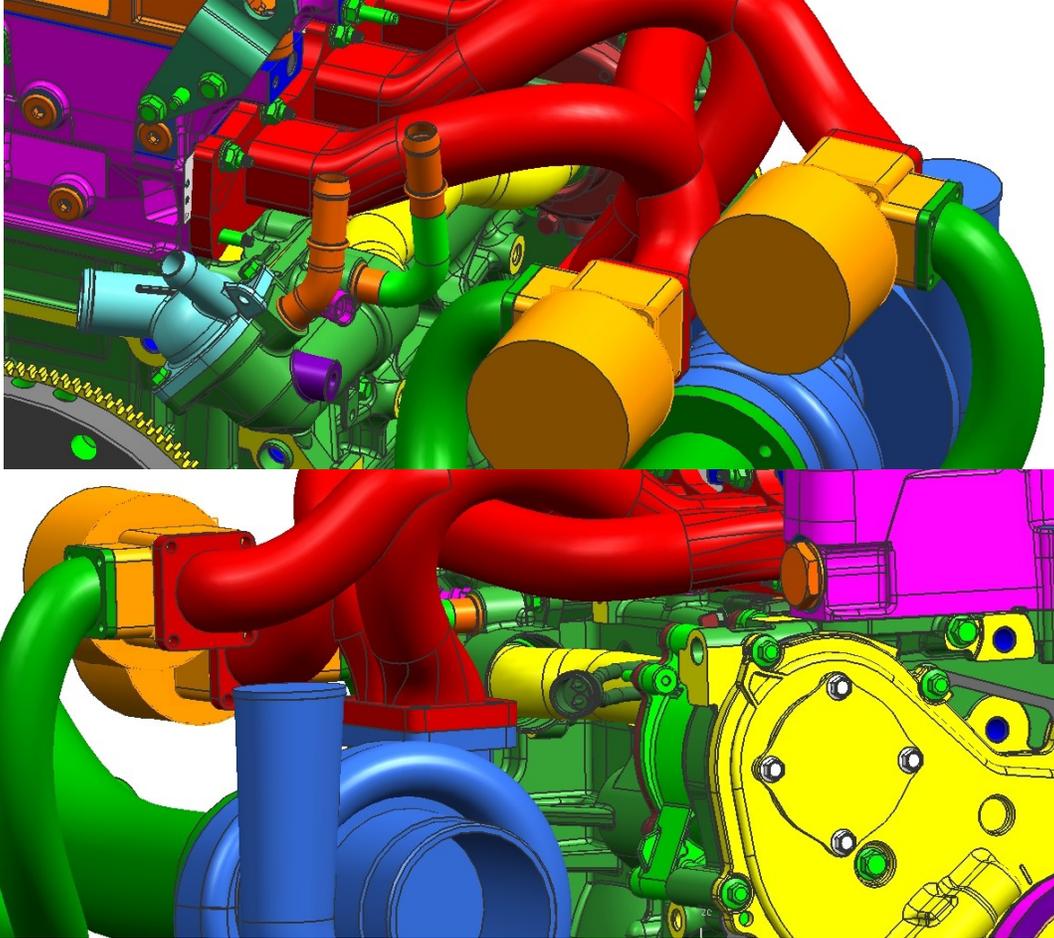


Fig. 113 No hay interferencia con el motor

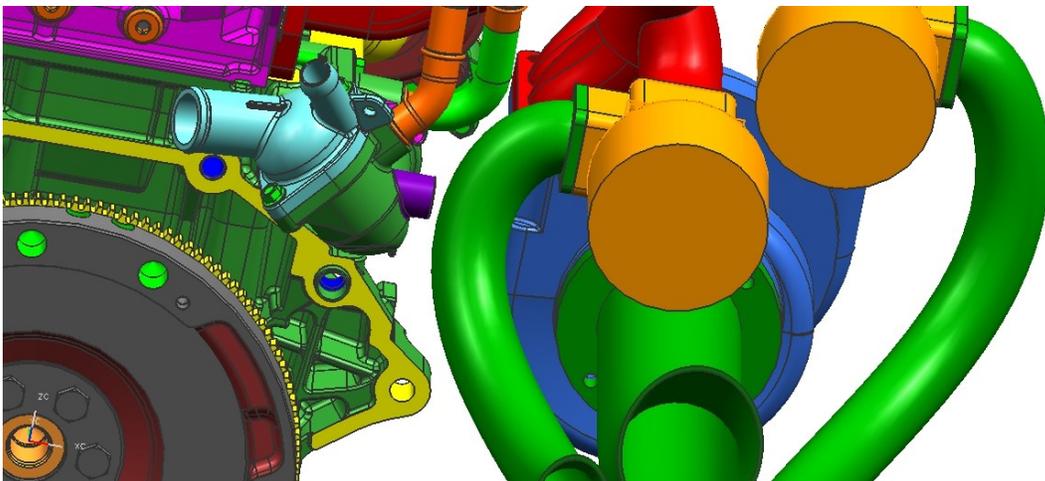


Fig. 114 No hay interferencia entre los tubos de escape y el motor

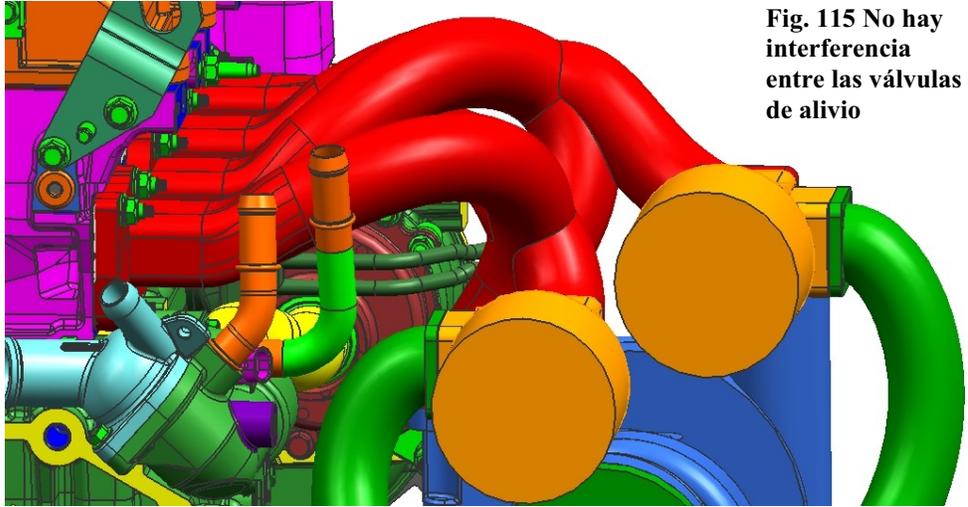


Fig. 115 No hay interferencia entre las válvulas de alivio

En la siguiente figura se ven las tuercas que sujetan perfectamente al múltiple el motor.

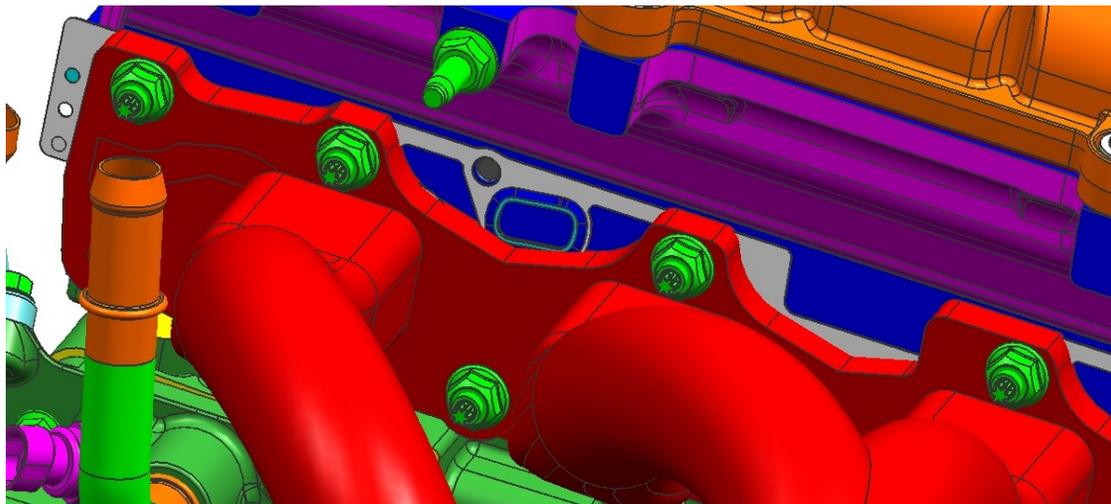


Fig. 116 Tuercas que sujetan el múltiple

Fig. 117 Vista lateral del ensamble

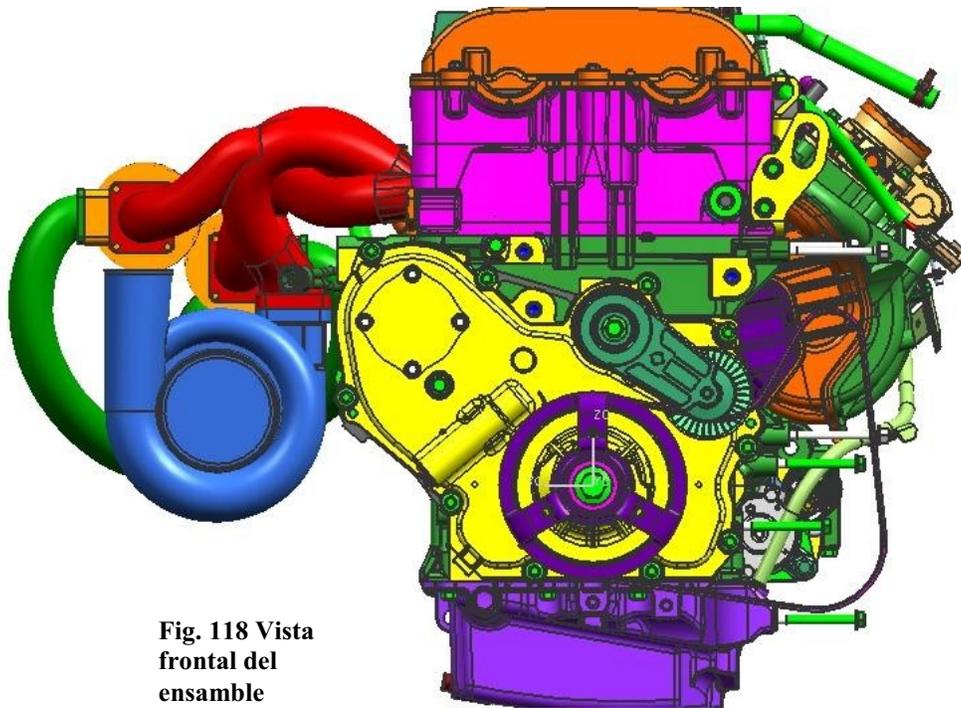
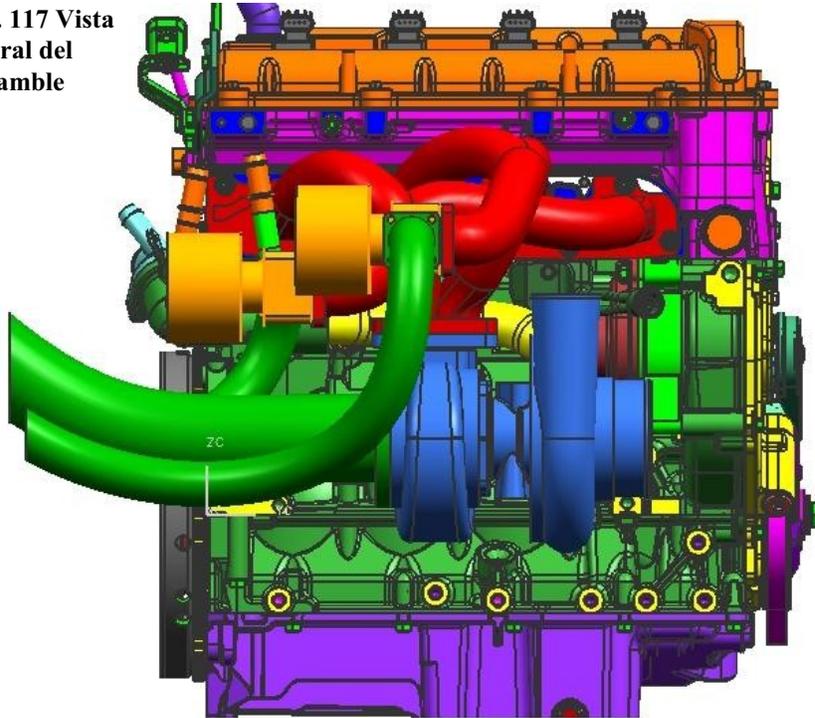


Fig. 118 Vista frontal del ensamble

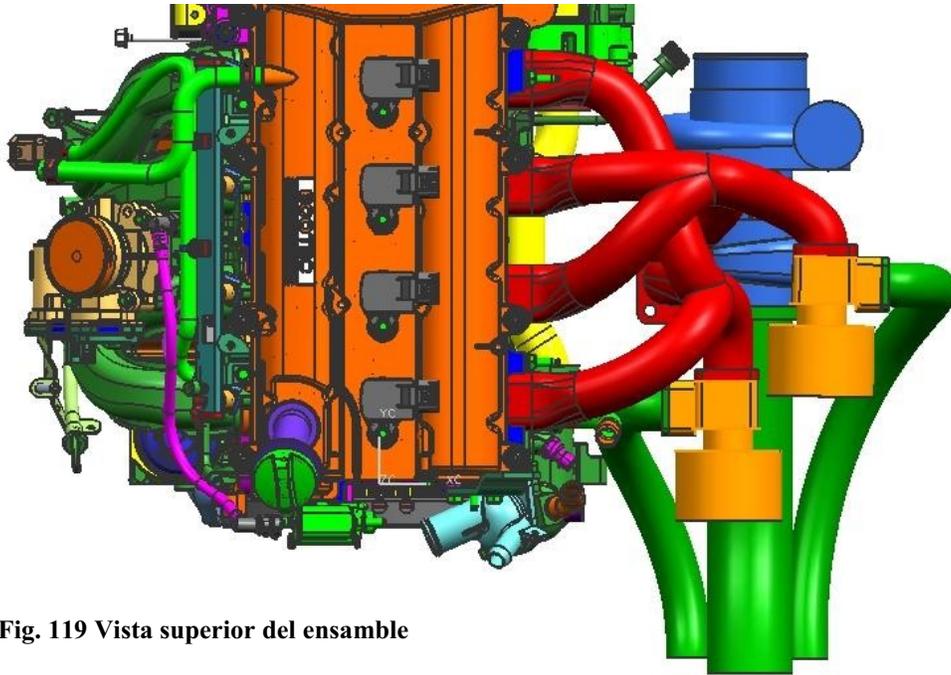


Fig. 119 Vista superior del ensamble

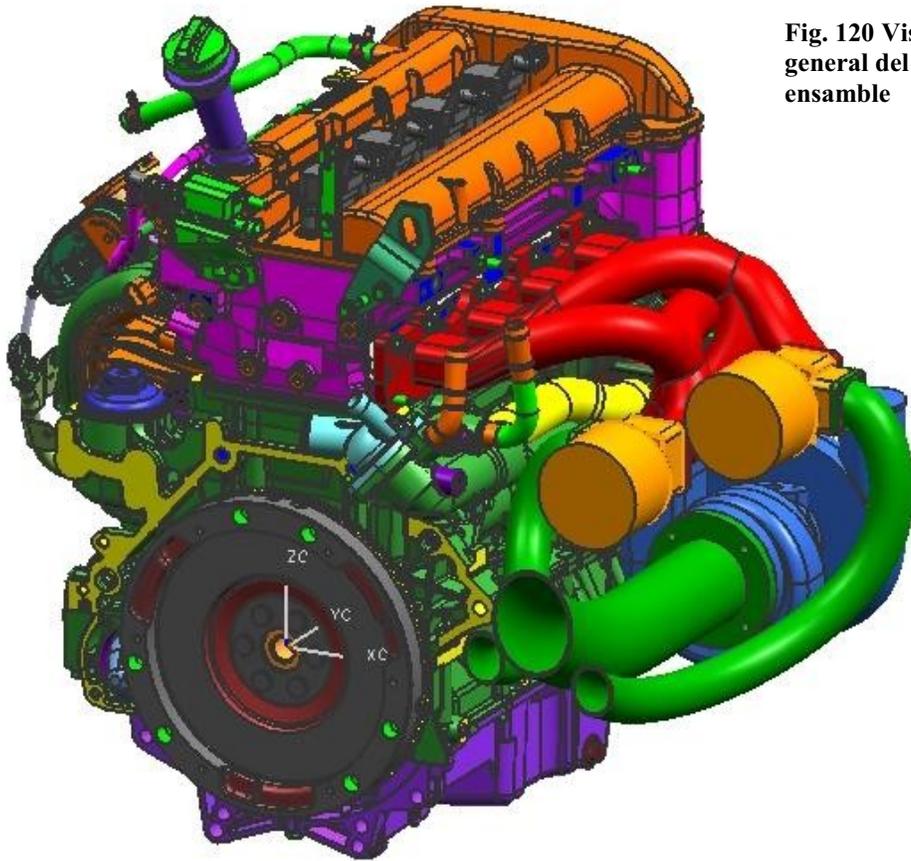
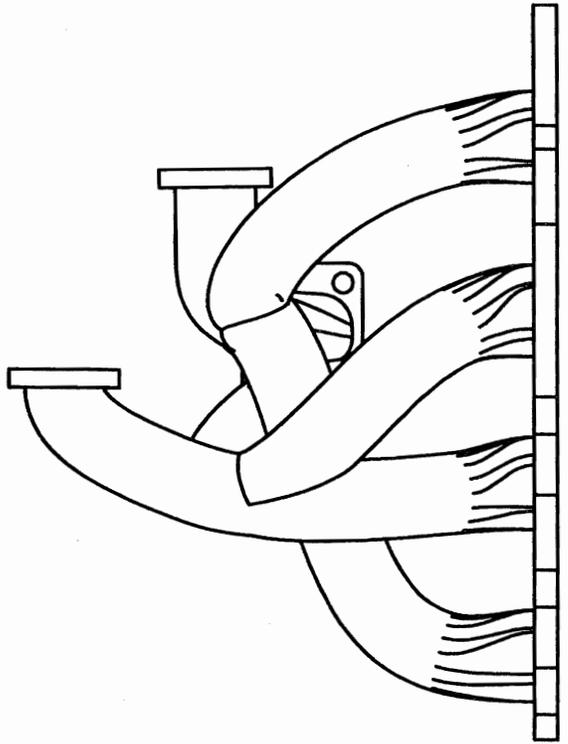
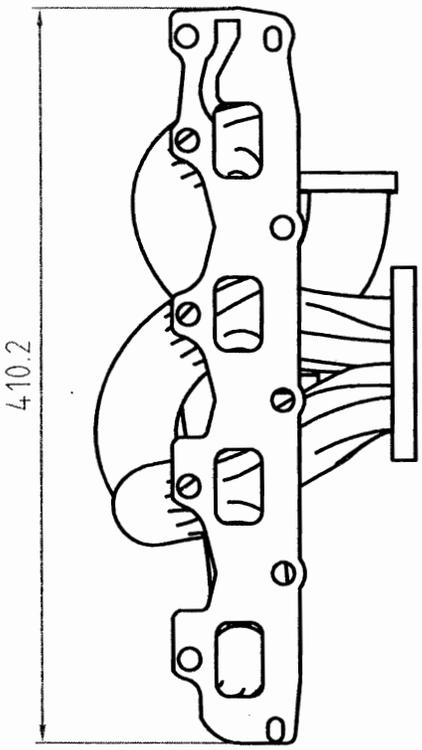
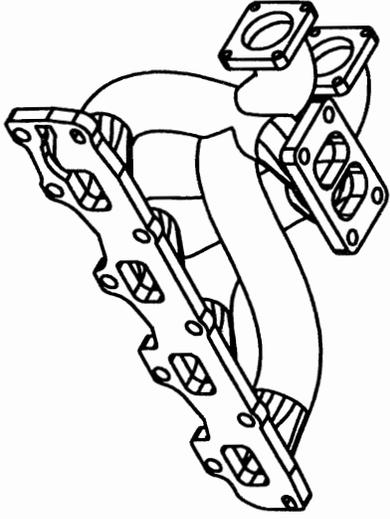
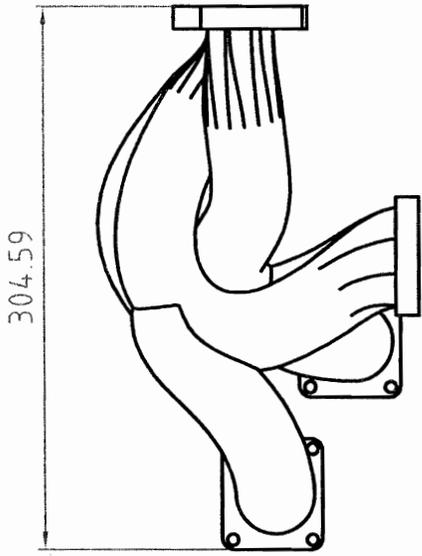
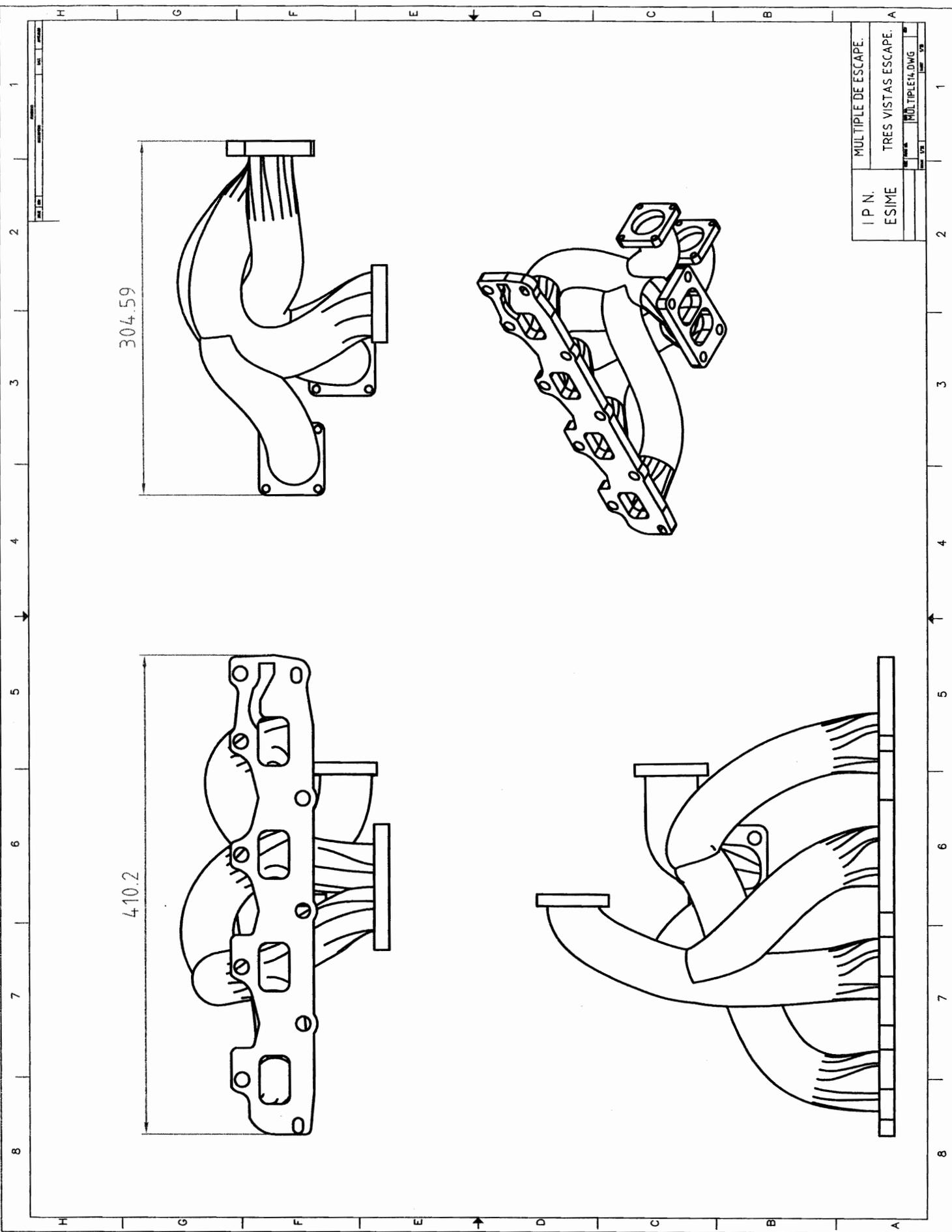
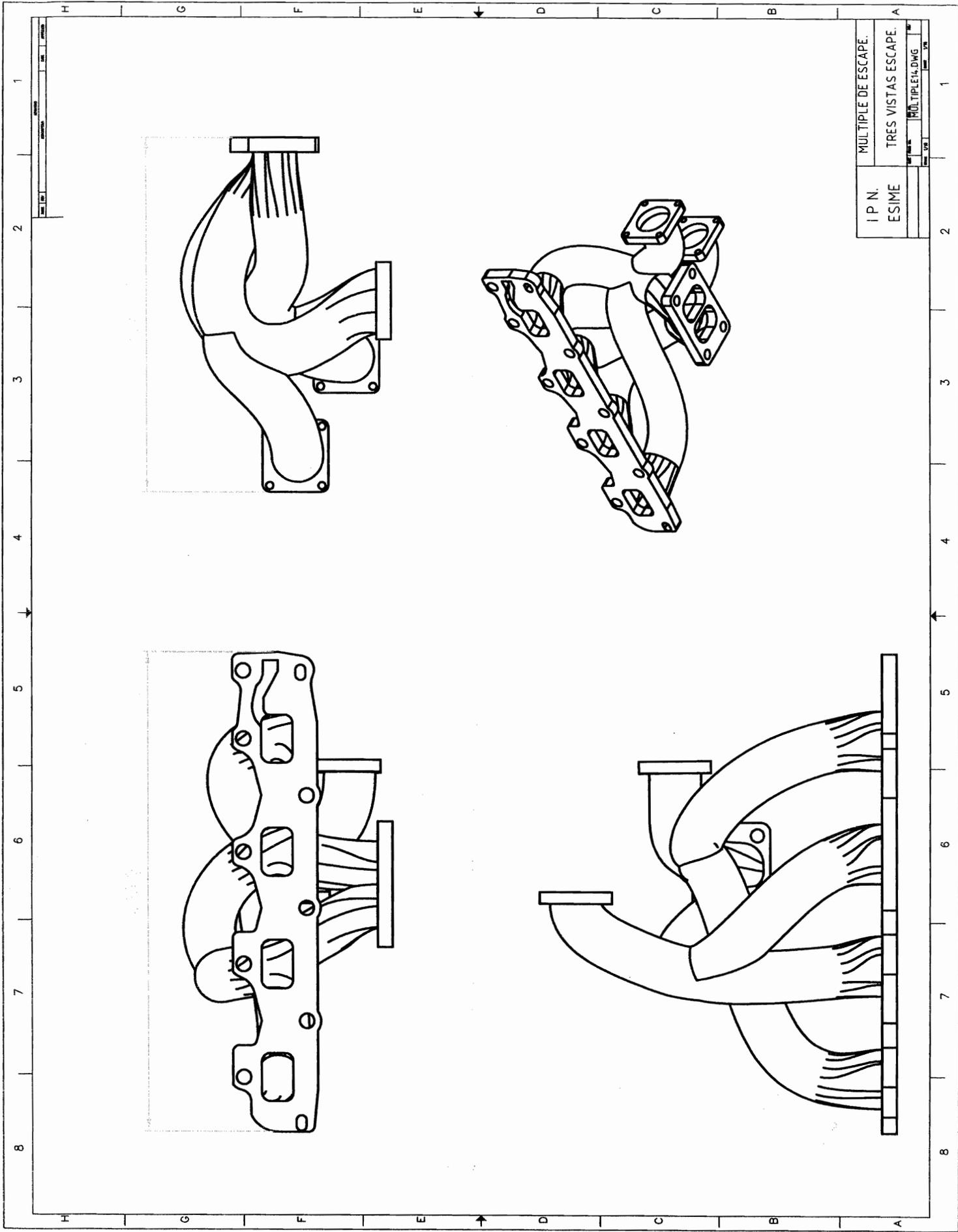


Fig. 120 Vista general del ensamble





MULTIPLE DE ESCAPE.	
I P. N.	ESIME
TRES VISTAS ESCAPE.	
MULTIPLE14.DWG	

METODO DE ENSAMBLE

Debido a que el sistema va a ser montado en un motor Ecotec, el cual además de nuestro sistema va a estar interactuado junto con otros sistemas o elementos, es necesario llevar a cabo una descripción del conjunto de pasos a seguir para ensamblar nuestro sistema de manera correcta y evitar errores como estrangulamiento de tornillos, interferencias, posicionamientos incorrectos, etc.

Los pasos a seguir para llevar a cabo el ensamble en el motor son:

1. Identificar las partes necesarias para el ensamble (múltiple de escape, turbocompresor con junta, válvulas de alivio, tubería de salida del sistema, junta de metal de la brida del motor, juntas de las bridas de las válvulas de alivio, y la tornillería necesaria).
2. Identificar la herramienta requerida en base a las especificaciones de la tornillería de sujeción de todo el sistema a ensamblar (destornilladores, matracas, dados, llaves españolas, etc.)
3. Una vez que se cuenta con todo el material necesario, se colocará la junta de la brida del motor en su posición correcta, ya que esta se encuentre perfectamente en su lugar, se ensamblará el múltiple de escape al motor utilizando la tornillería requerida para el sistema, recordando que el apriete de los tornillos deberá hacerse de manera cruzada y con un torque de 30 N-m.
4. Una vez que se haya ensamblado el múltiple al motor, se tomará el turbocompresor y se le colocará la junta que este requiere para el sellado entre este y el múltiple de escape. Una vez que el turbo esté listo para ensamblar, se tomará la tornillería necesaria para el turbo y se posicionará el turbo junto con el múltiple de escape con la finalidad de sujetarlo mediante un apriete de los tornillos de manera cruzada, tal y como lo hicimos en el paso 3.
5. Después de lo anterior, se tomarán las válvulas de alivio y de igual manera que como lo hicimos con el múltiple y el turbo, se le colocarán las juntas

que requieren ambas válvulas y se colocaran en el múltiple de escape haciendo un apriete cruzado de su tornillería.

6. Por último, se colocaran los tubos de salida del sistema de una manera muy similar a las partes ya previamente instaladas sin olvidar el torque de 3Nm. Es importante mencionar que al momento de colocar la tubería es indispensable hacerlo con mucho cuidado de tal manera que los tubos no vayan a golpear cualquiera de los componentes que lo rodean.
7. Una vez que se haya ensamblado el sistema, se verificara que todos los componentes estén en la posición correcta, que no haya interferencias, que no existan puntos abiertos en el sistema debido a un mal apriete, etc.

Conclusiones

Como conclusión se puede decir que el objetivo de este proyecto se cumplió, ya que no solo se logro diseñar el sistema de escape para los parámetros requeridos, si no que se logro implementar un acoplamiento en el múltiple de escape para un turbocompresor de 17lb de peso con entrada dividida T3. Además de lo anterior se diseño el sistema para que este integrara un acoplamiento para 2 válvulas de alivio de 40mm de diámetro interior a la entrada.

Por otro lado, en cuanto a los parámetros estructurales, por medio de NX Nastran obtuvimos que el múltiple tiene las siguientes características:

1. Desplazamiento máximo de 7.963×10^{-2} mm.
2. Esfuerzo máximo de 21.91 MPa.
3. Deformación máxima de 1.05×10^{-4} mm.

De lo anterior podemos ver que el esfuerzo máximo que presenta nuestro diseño lo soporta perfectamente el material con el que fue construido el sistema, el cual es Acero 4130 que soporta 280 ksi ó 1930.5 MPa. Entonces gracias a esto podemos concluir que el múltiple de escape soportara los esfuerzos incluyendo el peso del sistema del turbocompresor durante las condiciones de desempeño que determinamos.

Ahora, en cuanto al análisis de flujo, tenemos que el múltiple de escape presenta las siguientes características:

1. Velocidad máxima de salida de 209m/s.
2. Temperatura máxima de 873°K o 600°C.
3. Flujo másico de .115 Kg/s a la entrada y a la salida. (idealmente).

En base a esto una vez más concluimos que nuestro sistema cumple con el objetivo, ya que la temperatura del sistema se encuentra muy por debajo de la temperatura a la cual el acero funde, que es de 1375°C.

Por último solo resta decir que también en cuanto a las pruebas de sellado que se aplicaron al sistema, se concluyo que este no contaba con fugas, lo anterior se observo ya que al sellar el sistema y aplicarle una presión constante de 120psi este no sufrió ningún tipo de deterioro o fuga, presión que es mucho mayor a la presión requerida de diseño, la cual era de 60psi.

Recomendaciones para futuros estudios

- Analizar estructuralmente considerando la temperatura bajo la cual estará funcionando el sistema y evaluar el impacto que tendrá en el esfuerzo, deformación y desplazamiento.
- Realizar un análisis modal que permita determinar la frecuencia de vibración y evaluar el impacto que tiene con otras partes que transmiten vibración externa al sistema.
- Analizar estructuralmente considerando todos los elementos que estarán interactuando con el múltiple de escape, válvulas de alivio, ductos de escape y montantes.
- Analizar las pérdidas de flujo másico debido a la bifurcación en las válvulas de alivio y su impacto en la presión que se obtiene a la entrada del turbocompresor.
- Estudiar la interferencia que existiría al aplicar pulsos de fluido equivalentes a la frecuencia de la apertura y cierre de las válvulas de escape para los cuatro cilindros.
- Evaluar el comportamiento del fluido a la entrada del turbocompresor comprobando que la entrada T3 permite tener un flujo de gases de combustión uniforme.
- Evaluar el comportamiento del sistema en un banco de pruebas y hacer análisis de fluidos en base a datos reales. (Presión, Velocidad, Temperatura, Dilatación del material)

Referencias bibliográficas

Libros

1. Bell, Corky (2002). *Maximum Boost: Designing, Testing, and Installing Turbocharger System*. Primera edición, USA, Bentley Publishers
2. Norton, R., (1999) *Diseño de Maquinas*. Primera Edición, México, PRENTICE HALL.
3. White, Frank M. (2004) *Mecánica de fluidos*. 5a ed, España, McGraw-Hill.
4. Smith, Philip H. y Morrison, John C., (2003) *The Scientific Design of Exhaust and Intake Systems*. Primera edición, USA, Bentley Publishers

Hemerografía

5. Jawad, Badih et al., (2002) *Exhaust system design for a four cylinder engine* en *SAE Technical Paper Series*. 25 de diciembre de 2002.

Internet

6. GM Performance Division, (2006) “300+ HP Ecotec Four Cylinder Performance Engine”. [En línea]. USA, http://gmperformancedivision.com/performance_articles.aspx [Accesado el día 18 de septiembre de 2007]
7. GM Performance Division, (2006) “GM tuner Cobalt car build”. [En línea]. USA, http://gmperformancedivision.com/performance_articles.aspx [Accesado el día 18 de septiembre de 2007]
8. GM Performance Division, (2006) “Ecotec 2.0L LSJ Power Manual”. [En línea]. USA, http://gmperformancedivision.com/performance_articles.aspx [Accesado el día 18 de septiembre de 2007]
9. GM Tuner Source, (2007) “Chevrolet Cobalt accesories”. [En línea]. USA, <http://tunersource.gmblogs.com/Accessories/Chevrolet-Cobalt> [Accesado el día 11 de marzo de 2008]

10. GM Powertrain, (2004) "Ecotec 2.2L". [En línea]. USA, <http://www.gmpowertrain.com> [Accesado el día 10 de septiembre de 2007]
11. Turbo by Garrett, (2005-2006) "Turbocharger GT3782". [En línea]. USA, <http://www.turbobygarrett.com> [Accesado el día 21 de septiembre de 2007]
12. Tial Sport, (2005) "Válvula de alivio F40". [En línea]. USA, http://www.tialsport.com/prod_wg_40.htm [Accesado el día 7 de noviembre de 2007]
13. Team Center Community, (2006) "BYU images". [En línea]. USA, http://community.et.byu.edu/_layouts/tcclogin/login.aspx?ReturnURL=%2f [Accesado el día 5 de febrero de 2008]
14. Conocimientos básicos del automóvil, (2002) "Equipo de admisión y escape" [En línea]. Cuba. <http://www.transporte.cu/ignicion/cd2002/teoria.htm> [Accesado el día 1 de febrero de 2008]
15. Tuning de automóviles, (2008) "Headers, múltiples y escapes". [En línea]. Argentina, disponible en: <http://tuning.deautomoviles.com.ar/contacto.html> [Accesado el día 1 de febrero de 2008]
16. Aircraft Spruce, (2008) "Aircraft Spruce & Specialty Co.". [En línea]. USA. www.aircraftspruce.com [Accesado el día 5 de marzo de 2008]
17. Wikipedia, (2008) "Método del elemento finito". [En línea]. México. http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos [Accesado el día 26 de mayo de 2008]
18. Indura, (2007) "Manual de soldadura". [En línea]. Chile <http://www.indura.net/> [Accesado el día 3 de junio de 2008]