

# UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

Optimización del múltiple de escape para un vehículo de competición con motor de combustión  
interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros

Edwin Salomón Arroyo Terán

Nota del autor

Edwin Salomón Arroyo Terán, Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería, Universidad  
Internacional SEK.

Director Ing. Juan Carlos Rocha, M.Sc.

Codirector Ph.D. Edilberto Llanes Cedeño

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

[earroyo.mdm@uisek.edu.ec](mailto:earroyo.mdm@uisek.edu.ec)

### **Declaración Juramentada**

Yo, Edwin Salomón Arroyo Terán, con cédula de identidad 100277407-1, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

EDWIN SALOMÓN ARROYO TERÁN  
C.I.: 100277407-1

**Índice de contenidos**

Índice de contenidos .....	3
Índice de tablas .....	7
Índice de figuras.....	9
Resumen.....	14
Abstract .....	15
Introducción .....	16
Estado del arte.....	19
Rendimiento en los motores de combustión interna alternativos. ....	19
Ondas de presión o pulsos durante la carrera de escape. ....	21
Diseño computacional.....	24
Aplicación de simulaciones 1D y 3D en el sistema de escape. ....	28
Pruebas dinamométricas. ....	31
Método .....	33
Tipo de investigación.....	33
Método .....	33
Metodología .....	33
Datos del Vehículo.....	34
Cálculos introductorios .....	36
Determinación de dimensiones. ....	36

Efectos de la configuración del múltiple de escape.....	38
Simulación 1D .....	39
Simulación 3D .....	49
Modelado 3D. ....	49
Mallado. ....	49
Configuración en CFX-Pre. ....	50
Construcción de Múltiple de Escape.....	55
Pruebas Dinamométricas .....	57
Resultados .....	60
Cálculos introductorios .....	60
Simulación 1D .....	60
Obtención de resultados con múltiple de escape original.....	61
Obtención de resultados con múltiple de escape configuración 4-2-1. ....	63
Obtención de resultados con múltiple de escape configuración 4-1.....	65
Simulación 3D .....	67
Modelado. ....	67
Mallado. ....	69
CFX-Post.....	71
Construcción de Múltiple de Escape.....	78
Pruebas Dinamométricas .....	80

Obtención de potencia con múltiple de escape original.....	80
Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo A.....	82
Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo B.....	84
Obtención de torque con múltiple de escape original.....	86
Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo A.....	88
Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo B.....	90
Análisis y Discusión de Resultados .....	92
Análisis de los Cálculos Introdutorios .....	92
Simulación 1D .....	92
Configuración 4-2-1.....	92
Configuración 4-1.....	93
Análisis comparativo entre configuraciones.....	95
Simulación 3D .....	98
Análisis estático.....	98
Análisis transitorio.....	100
Construcción de Múltiples .....	104
Pruebas Dinamométricas .....	105
Comparación entre Resultados de Simulación y Pruebas Dinamométricas .....	108
Múltiple original.....	108
Múltiple configuración 4-1.....	111

Conclusiones .....	114
Recomendaciones .....	117
Referencias Bibliográficas .....	118
Anexos .....	123
Anexo 1. Ficha Técnica Suzuki 1.3 .....	123
Anexo 2. Licencia Estudiantil de ANSYS .....	124
Anexo 3: Propiedades del material ASTM A500 .....	125
Anexo 4: Ficha técnica dinamómetro MAHA LPS 3000 .....	126
Anexo 5: Pruebas Dinamométricas.....	127
Múltiple de escape original.....	127
Múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo A. ....	131
Múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo B. ....	135
Anexo 6. Reportes de simulaciones en ANSYS .....	139
Múltiple original. ....	139
Múltiple configuración 4-1. ....	142
Múltiple configuración 4-2-1.....	145
Anexo 7. Planos de construcción múltiple de escape 4-1 .....	148

**Índice de tablas**

Tabla 1. Especificaciones del motor .....	35
Tabla 2. Especificaciones de válvulas y conductos .....	35
Tabla 3. Diagrama de orden de encendido y fases.....	39
Tabla 4. Bloques utilizados en OpenWAM .....	39
Tabla 5. Condiciones de trabajo y geometría del motor .....	40
Tabla 6. Definición de modelo y parámetros de ejecución.....	40
Tabla 7. Parámetros de válvulas .....	41
Tabla 8. Parámetros de conductos de admisión .....	43
Tabla 9. Parámetros del sistema de escape .....	44
Tabla 10. Parámetros de la tubería del múltiple de escape .....	47
Tabla 11. Rangos de Skewness y calidad de elemento .....	50
Tabla 12. Parámetros utilizados en el estudio estático .....	51
Tabla 13. Condiciones de frontera para análisis estático .....	52
Tabla 14. Parámetros utilizados en el estudio transitorio .....	53
Tabla 15. Condiciones de tiempo en estudio transitorio.....	54
Tabla 16. Dimensiones de referencia iniciales para múltiple de escape.....	60
Tabla 17. Resultados obtenidos en OpenWAM de potencia y torque para múltiple original .....	61
Tabla 18. Potencia obtenida al relacionar las longitudes de colector primario y secundario .....	63
Tabla 19. Resultados obtenidos en OpenWAM de potencia y torque para múltiple de escape 4-2-1.....	63
Tabla 20. Potencia obtenida al variar las longitudes del colector en pasos de 50 mm .....	65
Tabla 21. Potencia obtenida al variar las longitudes del colector en pasos de 25 mm .....	65

Tabla 22. Resultados obtenidos en OpenWAM de potencia y torque para múltiple de escape 4-1 .....	66
Tabla 23. Tiempos para visualización de resultados .....	73
Tabla 24. Resultados de potencia con el múltiple de escape original.....	81
Tabla 25. Resultados de potencia con el múltiple de escape 4-1, tipo A.....	83
Tabla 26. Resultados de potencia con el múltiple de escape 4-1, tipo B.....	85
Tabla 27. Resultados de torque con el múltiple de escape original .....	87
Tabla 28. Resultados de torque con el múltiple de escape 4-1, tipo A .....	89
Tabla 29. Resultados de torque con el múltiple de escape 4-1, tipo B .....	91
Tabla 30. Tabla estadística de valoración de potencia al variar la longitud del colector de 500 a 800 mm .....	93
Tabla 31. Tabla estadística de valoración de potencia al variar la longitud del colector de 650 a 800 mm .....	94
Tabla 32. Tabla estadística de valoración de torque y potencia según la configuración del múltiple .....	95
Tabla 33. Tabla estadística de los parámetros en la entrada del múltiple.....	98
Tabla 34. Tabla estadística de velocidad de salida .....	102
Tabla 35. Tabla estadística de potencia y torque medidos.....	106
Tabla 36. Diferencia de resultados potencia entre simulación y pruebas dinamométricas para múltiple original.....	109
Tabla 37. Diferencia de resultados potencia entre simulación y pruebas dinamométricas para múltiple 4-1 .....	112



**Índice de figuras**

Figura 1. Múltiples de escape: (a) 4-1, (b) 4-2-1.....	17
Figura 2. Tipos de múltiples de escape según construcción: (a) fundición, (b) doblado, (c) step header. Fuente (a,b) Autor, (c) (Billy Boat Exhaust, 2017).....	18
Figura 3. Diagrama de la distribución de un motor de cuatro tiempos. Fuente (Benajes & Navarro, 2011) .....	20
Figura 4. Uniones direccionales y convertidores de impulsos: (a) concéntrico o tipo Birmann, (b) simétrico o tipo Sulzer, (c) compacto o modular y (d) múltiple. Fuente (Serrano & Galindo, 2011). .....	23
Figura 5. Gasto instantáneo en la válvula de escape (sentido positivo saliente del cilindro). Fuente (Torregrosa & Giménez, 2011).....	23
Figura 6. Morfología típica de curvas características a plena carga (a) y variación del rendimiento indicado, mecánico y efectivo (b) de un MCIA. Fuente (Rodríguez & Nogueira, 2011). .....	32
Figura 7. Metodología para optimización del múltiple de escape .....	34
Figura 8. Forma de la unión entre los conductos. Fuente (Gillieri, 2007).....	37
Figura 9. Secciones del sistema de admisión.....	41
Figura 10. Ingreso de parámetros en conductos de admisión .....	42
Figura 11. Secciones del sistema de escape.....	43
Figura 12. Ingreso de parámetros en conductos de escape .....	44
Figura 13. Configuración 4-1 en OpenWAM.....	45
Figura 14. Configuración 4-2-1 en OpenWAM.....	45
Figura 15. Variables para estudio paramétrico .....	46

Figura 16. Variables para resultados promedio del motor 4T ..... 48

Figura 17. Variables para resultados instantáneos en los cilindros del motor ..... 48

Figura 18. Parámetros del dominio en estudio estático ..... 51

Figura 19. Condiciones de ingreso en estudio estático ..... 52

Figura 20. Parámetros del dominio en estudio transitorio ..... 53

Figura 21. Condiciones de control de solver ..... 54

Figura 22. Ajustes del tipo de análisis ..... 54

Figura 23. Condiciones de frontera en el ingreso del múltiple de escape..... 55

Figura 24. Dobladora de tubos hidráulica..... 56

Figura 25. Sección de tubería doblada, corte a 80° ..... 56

Figura 26. Vehículo de pruebas en dinamómetro de chasis LPS 3000..... 59

Figura 27. Finalización del proceso de simulación en OpenWAM ..... 61

Figura 28. Curvas de potencia y torque para múltiple original..... 62

Figura 29. Gasto másico instantáneo en las válvulas de escape del motor con múltiple de escape original ..... 62

Figura 30. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-2-1 ..... 64

Figura 31. Gasto másico instantáneo en las válvulas de escape del motor con múltiple 4-2-1 .... 64

Figura 32. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-1 ..... 66

Figura 33. Gasto másico instantáneo en las válvulas de escape del motor con múltiple 4-1 ..... 67

Figura 34. Múltiple de escape original: (a) modelado 3D, (b) volumen interno ..... 68

Figura 35. Múltiple de escape 4-2-1: (a) modelado 3D, (b) volumen interno ..... 68

Figura 36. Múltiple de escape 4-1: (a) modelado 3D, (b) volumen interno ..... 69

Figura 37. Mallado del dominio en el múltiple de escape original..... 70

Figura 38. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-2-1 .....	70
Figura 39. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1 .....	71
Figura 40. Resultados del análisis estático en múltiple de escape original: (a) velocidad, (b) presión.....	72
Figura 41. Resultados del análisis estático en múltiple de escape 4-2-1: (a) velocidad, (b) presión .....	72
Figura 42. Resultados del análisis estático en múltiple de escape 4-1: (a) velocidad, (b) presión	73
Figura 43. Velocidad en múltiple de escape original, análisis transitorio: .....	74
Figura 44. Presión en múltiple de escape original, análisis transitorio:.....	75
Figura 45. Velocidad en múltiple de escape 4-2-1, análisis transitorio:.....	76
Figura 46. Presión en múltiple de escape 4-2-1, análisis transitorio: .....	76
Figura 47. Velocidad en múltiple de escape 4-1, análisis transitorio: .....	77
Figura 48. Presión en múltiple de escape 4-1, análisis transitorio:.....	77
Figura 49. Base para soldadura de múltiples de escape conforme al diseño: (a) modelo CAD, (b) construcción. ....	78
Figura 50. Múltiple de escape 4-1, tipo A: (a) proceso de construcción, (b) resultado final.....	79
Figura 51. Proceso de ensamblaje de tubería: (a) dimensiones de diseño, (b) construcción .....	79
Figura 52. Múltiple de escape 4-1, construcción tipo B: (a) proceso de construcción, (b) resultado final. ....	80
Figura 53. Curvas de potencia con múltiple de escape original .....	82
Figura 54. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, tipo A .....	82
Figura 55. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, tipo B.....	84
Figura 56. Curvas de torque con múltiple de escape original.....	86

Figura 57. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, tipo A.....	88
Figura 58. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, tipo B .....	90
Figura 59. Comparación de potencia para varias dimensiones en la configuración 4-2-1 .....	92
Figura 60. Comparación de potencia para longitudes entre 500 a 800 mm, cada 50 mm .....	93
Figura 61. Comparación de potencia para longitudes entre 650 a 800 mm, cada 25 mm .....	94
Figura 62. Comparación de potencia máxima según configuración de múltiple.....	96
Figura 63. Porcentaje de variación de potencia máxima según configuración de múltiple.....	96
Figura 64. Comparación de torque máximo según configuración de múltiple.....	97
Figura 65. Porcentaje de variación de torque máximo según configuración de múltiple.....	97
Figura 66. Resumen de velocidad de entrada según el múltiple de escape .....	99
Figura 67. Porcentaje de variación de velocidad de entrada.....	99
Figura 68. Resumen de presión en la entrada según el múltiple de escape .....	100
Figura 69. Porcentaje de variación de presión de entrada .....	100
Figura 70. Presión a la entrada del múltiple de escape: (a) original, (b) configuración 4-2-1, (c) configuración 4-1 .....	101
Figura 71. Velocidad en la salida del múltiple de escape .....	102
Figura 72. Resumen de velocidad en la salida del múltiple de escape .....	103
Figura 73. Porcentaje de incremento de velocidad en la salida del múltiple .....	103
Figura 74. Diferencia de sección en la zona de curvatura de los tubos utilizados para la construcción: (a) tipo A, (b) tipo B.....	104
Figura 75. Comparación de curvas de potencia .....	105
Figura 76. Comparación de curvas de torque .....	105
Figura 77. Comparación de potencia máxima .....	106

Figura 78. Porcentaje de variación de potencia .....	107
Figura 79. Comparación de torque máximo. ....	107
Figura 80. Porcentaje de variación de torque.....	108
Figura 81. Comparación de curvas de potencia del múltiple original .....	109
Figura 82. Comparación de resultados de potencia para múltiple original.....	110
Figura 83. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple original .....	110
Figura 84. Comparación de curvas de potencia del múltiple 4-1 .....	111
Figura 85. Comparación de resultados de potencia para múltiple 4-1 .....	112
Figura 86. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple 4-1 .....	113

### Resumen

El incremento de potencia es una necesidad primordial en la preparación de un vehículo de competición. En la presente investigación se diseñó y construyó el múltiple de escape para un vehículo Suzuki *Twin Cam* con motor G13B. Para el efecto, se utilizó un modelo de motor unidimensional en el software OpenWAM, modificando la configuración del múltiple de escape y las dimensiones para elevar el rendimiento respecto al sistema original. Mediante el modelado 3D se llevó a cabo un estudio CFD en estado estático y transitorio, obteniendo las formas y distribución de la tubería más adecuada. El diseño más óptimo según las simulaciones, se construyó mediante dos métodos, doblado (tipo A) y *step header* (tipo B), los cuales se probaron en un dinamómetro de chasis para obtener las curvas características del motor. Los resultados, respecto al sistema original, muestran un incremento de potencia de 8.41 % y 10.33 %, según la construcción tipo A y tipo B, respectivamente; así como un aumento de torque de 3.26 % para el tipo A y 8.83 % para el tipo B. La comparación de los resultados computacionales con las pruebas experimentales demuestra que la metodología empleada es apropiada para el diseño del sistema de escape que mejore el desempeño del motor

*Palabras clave:* optimización múltiple de escape, vehículo de competición, CFD, OpenWAM, motor de encendido provocado.

### **Abstract**

The increase of power is a principal necessity in the preparation of a racing car. In the present investigation, the exhaust manifold for a Suzuki Twin Cam with G13B engine was designed and built. For this purpose, a one-dimensional engine model was used in the OpenWAM software, modifying the configuration of the exhaust manifold and the dimensions to increase the performance with respect to the original system. Through the 3D modeling, a CFD study was carried out in a steady and transient state, obtaining the shapes and distribution of the most suitable pipe. The most optimal design according to the simulations was built through two methods, bend tubes (type A) and step header (type B), which were tested in a chassis dynamometer to obtain the characteristic curves of the engine. The results, with respect to the original system, show a power increase of 8.41% and 10.33%, according to the construction type A and type B, respectively; as well as a torque increase of 3.26% for type A and 8.83% for type B. The comparison of the computational results with the experimental tests shows that the methodology used is appropriate for the design of the exhaust system that improves the performance of the engine.

*Keywords:* exhaust manifold optimization, racing car, CFD, OpenWAM, spark-ignition engine.

## **Introducción**

En Ecuador la preparación de vehículos de competencia, mediante la modificación de uno o varios sistemas automotrices, se ha desarrollado durante mucho tiempo en base a la experiencia ganada por los técnicos y talleres a través de un proceso de prueba y error, con el consecuente costo y tiempo elevado. Sin embargo, durante los últimos años, las exigencias crecientes en el mercado empresarial demandan la preparación y especialización de profesionales en áreas específicas, el uso de programas de modelado y simulación computacional, la inversión en herramientas, maquinaria y bancos de prueba de alta tecnología, a fin de ser competitivos, brindando soluciones en el menor tiempo y a bajo costo.

En otros casos, las autopartes de mejores prestaciones son adquiridas en el exterior a precios elevados y sin considerar que se diseñó para otras condiciones de funcionamiento debido a factores geográficos. Así pues, la economía ecuatoriana se ha caracterizado por ser simplemente proveedora de materia prima e importadora de los productos con mayor valor agregado, según indica la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (2012).

El gobierno ecuatoriano ha planteado la transformación de la matriz productiva, que permita tener un modelo democrático, incluyente y fomentado en el conocimiento y capacidades de los ecuatorianos, pasando de un modelo primario exportador y explotador de recursos a uno que fomente la producción con mayor valor agregado, con la ayuda de varios ejes de transformación, entre ellos, la sustitución a corto plazo de importaciones por bienes y servicios que los ecuatorianos estamos en capacidad de producir, por ejemplo: tecnología e industria metalmecánica (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2012).

El incremento de potencia es una de las principales necesidades en la preparación de un vehículo de competición y para lograrlo existen muchas modificaciones que pueden ser



realizadas, sean éstas, mecánicas o electrónicas, considerando materiales y formas mejor estructuradas. La investigación debe permitir el desarrollo nacional de autopartes, adecuadas a nuestro medio geográfico y con los recursos disponibles en el Ecuador, que reduzca la necesidad de importación de las mismas desde los mercados internacionales.

Por lo general en los vehículos destinados a competición, una de las partes comúnmente modificadas es el múltiple de escape, una pieza que recoge en todo momento los gases de al menos dos cilindros desde la culata y llega hasta la primera junta que lo separa del resto del sistema de escape, según lo define la Federación Internacional del Automovilismo (FIA) en el Anexo J (2017). Los múltiples o colectores se fabrican a partir de tubería redonda, pudiendo tener una configuración 4-1 o 4-2-1, como se observa en la figura 1.

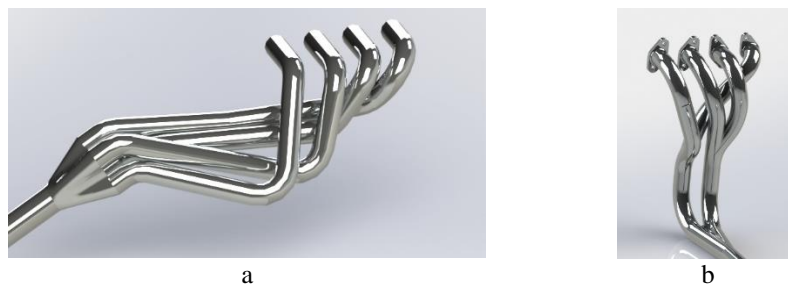


Figura 1. Múltiples de escape: (a) 4-1, (b) 4-2-1.

La Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo (FEDAK), es quien regula las modificaciones permisibles en un vehículo de competición. En cuanto al sistema de escape, según el Reglamento Técnico Campeonato Nacional De Circuito 2017, indica que es un componente libre en su preparación, lo cual no restringe su diseño y fabricación (Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo, 2017). Por ello muchos preparadores de vehículos modifican dicho sistema, de manera empírica, sin un estudio adecuado que permita obtener la máxima potencia posible en los motores.

En cuanto a la construcción de los múltiples de escape, los vehículos de serie generalmente poseen colectores de escape de fundición de hierro, sin embargo, los autos de alta gama o los múltiples fabricados, utilizan tubos de acero negro, galvanizado o inoxidable. Por otra parte, existen dos métodos mediante los cuales se pueden construir los colectores de escape. El más común y de menor costo es mediante el doblado de tubos, en los cuales se puede apreciar la reducción de la sección circular por aplastamiento en la zona de curvatura. El otro proceso se conoce como *step header*, consiste en la fabricación de los múltiples mediante la soldadura de tramos de tubería, utilizando tubos pre-doblados que mantienen la sección circular uniforme durante todo su recorrido, como se observa en la figura 2.

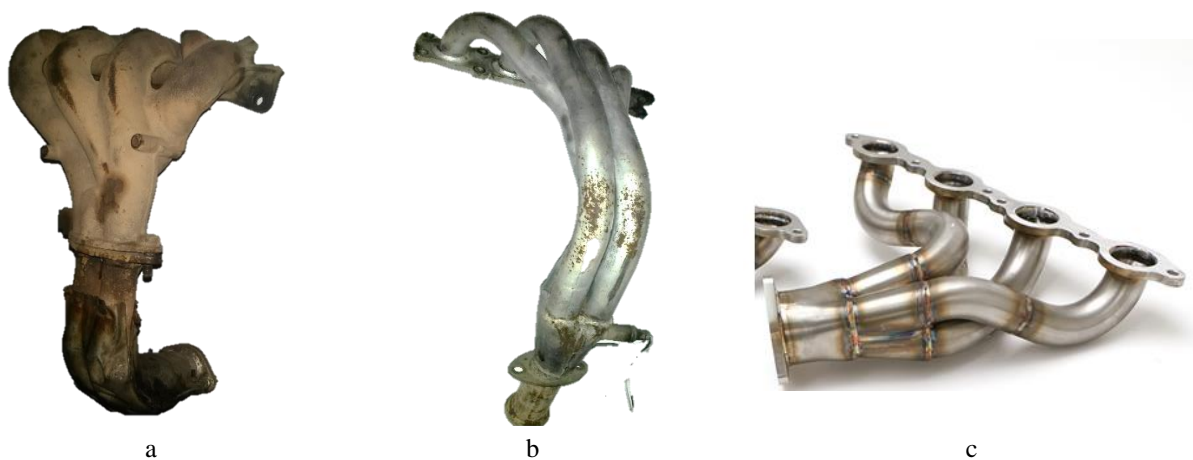


Figura 2. Tipos de múltiples de escape según construcción: (a) fundición, (b) doblado, (c) *step header*. Fuente (a,b)

Autor, (c) (Billy Boat Exhaust, 2017)

El diseño y fabricación de productos requiere que se lo haga con el menor uso de recursos, para los cual el proyecto tiene como objetivo general: diseñar y construir el múltiple de escape, conocido comúnmente como *header*, a partir de la simulación computacional 1D y 3D, para validarlos experimentalmente mediante pruebas dinamométricas.

Para lograr el objetivo anteriormente indicado es necesario: analizar las dimensiones del múltiple de escape y obtener las curvas características del motor con la herramienta 1D

OpenWAM, diseñar el múltiple en el software NX Siemens, realizar un análisis computacional de fluidos en el software 3D CFX de ANSYS, fabricar el modelo de colector diseñado bajo dos técnicas de construcción y probar el múltiple construido con el vehículo en un dinamómetro para comparar resultados respecto al sistema original.

A partir de las simulaciones se podrá optimizar el múltiple de escape para obtener mayor rendimiento en el motor del vehículo Suzuki GTi 1.3 Twin-Cam.

## **Estado del arte**

### **Rendimiento en los motores de combustión interna alternativos.**

Un motor puede ser considerado como un dispositivo que permite transformar cualquier tipo de energía, en energía mecánica, de allí entonces, se puede definir al motor térmico como el dispositivo que permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido compresible. Dentro de este grupo se encuentran los motores de combustión interna alternativos (MCIA), que según el proceso de combustión pueden ser de encendido provocado (MEP) o de encendido por compresión (MEC) (Benajes & Navarro, 2011).

Los motores alternativos según el ciclo de trabajo pueden ser de dos tiempos (2T) o de cuatro tiempos (4T), en estos últimos el ciclo de trabajo se completa en dos vueltas del cigüeñal o cuatro fases: admisión, compresión, expansión y escape. En estos procesos o fases se requiere adelantos y retrasos en la apertura-cierre de válvulas y en el inicio de la combustión, debido a la compresibilidad del aire y al hecho de que la combustión no puede producirse a volumen constante (Benajes & Navarro, 2011).

Los adelantos y retrasos en la apertura y cierre de las válvulas optimizan el llenado y vaciado del motor, mejorando las prestaciones y rendimiento (Lecuona & Rodríguez, 2011). La figura 3 muestra el diagrama de distribución de un motor de cuatro tiempos con los respectivos ángulos:

avance a la apertura de admisión (AAA), retraso al cierre de admisión (RCA), avance a la apertura de escape (AAE) y retraso al cierre de escape (RCE).

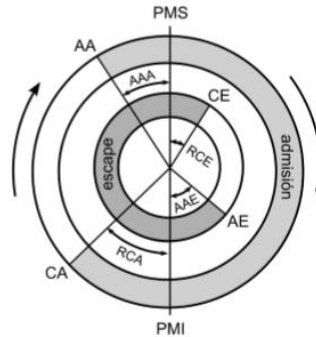


Figura 3. Diagrama de la distribución de un motor de cuatro tiempos. Fuente (Benajes & Navarro, 2011)

El uso de aditivos y bujías de alto rendimiento, instalación de computadoras programables, rediseño de múltiples de admisión y escape, trucaje de motores, sobrealimentación, entre otros, son modificaciones que apuntan en dos direcciones, una es mejorar los procesos termodinámicos del ciclo de trabajo, incrementando el trabajo indicado ( $W_i$ ), y otra, incrementar el rendimiento mecánico mediante la reducción de pérdidas entre el trabajo transferido por los gases al pistón y el trabajo mecánico disponible en el eje de salida o trabajo efectivo ( $W_e$ ). La diferencia entre el trabajo indicado y el trabajo efectivo se conoce como trabajo de pérdidas mecánicas ( $W_{pm}$ ), las cuales pueden ser de fricción, de bombeo o de accionamiento de auxiliares (Bermúdez & Tormos, 2011).

Durante el ciclo de trabajo completo, un motor de cuatro tiempos traza dos lazos en el diagrama p-V, en el cual el lazo superior corresponde al trabajo indicado y el lazo inferior al trabajo de bombeo (Serrano & Galindo, 2011).

Entre los aspectos influyentes en las pérdidas mecánicas por bombeo ( $pmb$ ) en un MEP, según Bermúdez y Tormos (2011), se tiene:

- Pérdida de carga en el sistema de admisión por la resistencia en el paso de aire (filtro, mariposa, conductos de culata y válvulas).
- Contrapresión de escape, que depende de la caída de presión en los elementos del sistema de escape debido a la resistencia ofrecida en el trayecto, puesto que la presión en el cilindro en la carrera de escape dependerá de ello.
- Avances y retrasos en el diagrama de distribución del motor a fin de optimizar los procesos de admisión y escape.
- Geometría de los colectores de admisión y escape acordes al diagrama de distribución para mejorar el llenado del cilindro y reducir el trabajo de bombeo.

Las pérdidas de bombeo al tener su origen en el proceso de renovación de la carga, se las puede reducir en base al dimensionamiento adecuado de válvulas de admisión y escape y/o mediante el diseño de los conductos de admisión y escape sintonizados con el diagrama de distribución (Bermúdez & Tormos, 2011).

Al incrementar la velocidad del motor, reducir las pérdidas por fricción o aumentar la eficiencia volumétrica, térmica y de combustión se logra mejorar potencia en el motor. De donde la eficiencia volumétrica tiene un mayor impacto en el rendimiento, y consiste en la eficacia del intercambio de gases, es decir el reemplazo de los gases quemados y el llenado del cilindro con gases frescos, o como ya se dijo el proceso de renovación de la carga (Deshmukh, Kumar, Garg, Nayeem, & Lakshminarasimhan, 2004).

### **Ondas de presión o pulsos durante la carrera de escape.**

Dentro del proceso de renovación de la carga existen fenómenos físicos como: rozamientos, compresibilidad del flujo, efectos de inercia del flujo, efectos de ondas y transmisión de calor. Particularmente, el proceso de escape provoca ondas de presión que se transmiten en los

conductos, donde la duración del pulso de presión se admite como la duración de la carrera de escape más el avance a la apertura del escape. Este fenómeno provoca interferencias entre cilindros, es decir, en un motor de cuatro cilindros, el pulso espontáneo de un cilindro coincide con el cruce de válvulas del cilindro anterior según el orden de encendido (Serrano & Galindo, 2011).

Los colectores de escape de impulsos, con una configuración 4-2-1, tienen como propósito generar un efecto de flujo direccional, que permita el incremento de energía cinética del flujo y evite la interferencia entre los pulsos de presión de escape debido al orden de encendido en los cilindros (Galindo, Luján, Serrano, Dolz, & Guilain, 2004).

Dicha configuración de múltiple 4-2-1, uniendo los conductos primarios del cilindro 1-2 y el 3-4 para luego conectarlos en una junta tipo Y, fue usada por Masi, Toffolo y Antonello (2010) en una motocicleta Kawasaki ZX6R-07 con motor de 599 cc, orden de encendido 1-2-4-3, al cual se aplicó además varias modificaciones en cámaras de combustión y volumen para aumentar la relación de compresión, sistema de control ECU programable, árboles de levas y muelles de válvulas mejorados, incrementando la potencia de salida en 33 % y torque en 16 %.

El pulso producido en la carrera de escape es de sobrepresión y puede ser reflejado en los elementos con cierto volumen como una onda de rarefacción que retorna hacia las válvulas de escape y puede producir dos tipos de beneficio en el motor. Si la onda reflejada llega durante el cruce de válvulas se puede dar un efecto de succión ayudando a evacuar los gases del cilindro, reducir residuales y producir cortocircuito desde la admisión al escape; por otra parte, si la onda de rarefacción llega durante la carrera de escape reducirá la presión en la válvula y por ende el trabajo de bombeo, por tanto, la sintonización del escape puede mejorar en un 5 % el rendimiento volumétrico de un motor (Serrano & Galindo, 2011).

Con la finalidad de reducir las interferencias entre cilindros, se diseñan las uniones de los conductos en los múltiples de escape con efecto direccional o evector, como los que se muestran en la figura 4, cuyo propósito es favorecer la evacuación de los gases hacia la salida y dificultar que el pulso de escape descargado por un cilindro remonte por las ramas laterales causando interferencia en el proceso de escape de otros cilindros (Serrano & Galindo, 2011).

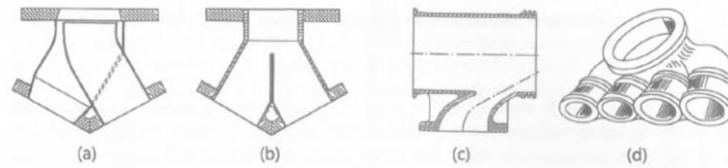


Figura 4. Uniones direccionales y convertidores de impulsos: (a) concéntrico o tipo Birmann, (b) simétrico o tipo Sulzer, (c) compacto o modular y (d) múltiple. Fuente (Serrano & Galindo, 2011).

El motor tiene un funcionamiento no estacionario, que se puede considerar como funcionamiento cuasiperiódico, por lo cual los procesos de flujo en los conductos de admisión y escape son de carácter no estacionario. En la curva de gasto másico en la válvula de escape, figura 5, se observan dos picos, el primero responde al escape espontáneo luego de la apertura de la válvula y el segundo debido a la expulsión de los gases en el movimiento ascendente del pistón, de allí que existe variación en el tiempo de los parámetros del flujo (Torregrosa & Giménez, 2011).

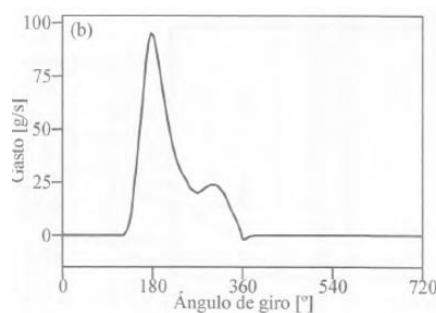


Figura 5. Gasto instantáneo en la válvula de escape (sentido positivo saliente del cilindro). Fuente (Torregrosa & Giménez, 2011)

En algunos casos se puede describir el fenómeno no estacionario en términos de flujo estacionario e incompresible. Esta aproximación se puede aplicar aguas abajo de la unión del colector para regímenes de giro del motor altos, valorando el flujo en el escape a través de la pérdida de carga producida por el mismo, que hace referencia a la contrapresión de escape, parámetro empleado comúnmente para establecer los requerimientos del sistema de escape y su influencia sobre las prestaciones del motor (Torregrosa & Giménez, 2011).

La temperatura de los gases que salen del cilindro en el escape es elevada, por lo que no puede despreciarse la transferencia de calor entre los gases y la pared de los conductos. Dicho intercambio de calor, determina la temperatura de los gases en los colectores de escape y la velocidad de propagación de las ondas de presión, que pueden ser aprovechadas mediante el diseño adecuado de la geometría del colector para mejorar ciertas prestaciones (Torregrosa & Giménez, 2011).

Los gases expulsados del cilindro comprimen y desalojan los gases presentes en el conducto de escape. Conforme los gases se desplazan hacia la boca de escape, el proceso de transferencia de calor con las paredes se hace menos pronunciado, promoviendo la reducción de temperatura. (Torregrosa & Giménez, 2011)

### **Diseño computacional.**

En la actualidad, para lograr el máximo desempeño en el diseño de autopartes, se utiliza software de ingeniería que permita simular condiciones de trabajo reduciendo costosas pruebas experimentales. El modelado del motor o sus sistemas hace referencia al cálculo mediante modelos matemáticos que se implementan computacionalmente y permite evaluar varias opciones de diseño, predecir las prestaciones que el motor alcanzaría e identificar las variables de control de los procesos, modificando las variables de entrada para observar su repercusión en



las variables de salida, de gran utilidad en estudios paramétricos; sin embargo, es necesario validarlos mediante el ensayo experimental (Galindo & Hernández, 2011).

En los modelos según se considere la variación temporal pueden ser estacionarios, cuasiestacionarios o transitorios, de igual manera según la representación espacial de los fenómenos físicos se pueden tener modelos cerodimensionales (0D), unidimensionales (1D) o multidimensionales (2D o 3D). En los modelos unidimensionales, existe resolución espacial en una de las variables espaciales, mientras que, en los multidimensionales se considera las variaciones de las propiedades del sistema en dos o tres variables espaciales (Galindo & Hernández, 2011).

Los modelos unidimensionales de acción de ondas (wave action model o WAM) permiten calcular el flujo en conductos, mediante la combinación de canales unidimensionales, depósitos cerodimensionales y elementos no dimensionales (Galindo & Hernández, 2011). CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia ha desarrollado la herramienta gas-dinámica 1D de código libre, llamada OpenWAM. En los modelos de acción de onda, se puede representar el motor mediante conductos, considerando la propagación de ondas en una sola dimensión, lo que ha permitido su aplicación en competición y desarrollo de motores de alto rendimiento, brindando soporte durante el proceso de diseño de los elementos presentes en los sistemas de admisión y de escape, a fin de obtener información rápida acerca de las modificaciones realizadas en la trayectoria de los gases (CMT-Motores Térmicos, 2017).

El programa OpenWAM calcula el flujo interno en los conductos asumiendo flujo unidimensional, no viscoso y no-lineal. La unión entre conductos y reservorios, así como el cálculo de los elementos donde el flujo no es unidimensional, lo realiza usando ecuaciones de

conservación simplificadas sin resolución espacial y normalmente cuasiestacionario (Galindo, Tiseira, Fajardo, & Navarro, 2011).

La base de los modelos de acción de ondas es el modelo de conducto en el que las variables de entrada son su geometría y las condiciones del flujo en sus extremos. Las variables de salida del modelo de conducto serían los valores de densidad, presión, temperatura y velocidad del fluido en función del tiempo y de la posición dentro del tubo. Las ecuaciones que se resuelven son las de estado y las de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento. El sistema de ecuaciones de Euler que se plantea es un caso particular de las ecuaciones de Navier-Stokes para un dominio cuasiunidimensional con fluido ideal no viscoso. (Galindo & Hernández, 2011, pág. 754)

$$p = \rho RT \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{S} \frac{dS}{dx} = 0 \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] - a^2 \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] - (\gamma - 1)\rho(q + uG) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G = 0 \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores,  $p$  corresponde a la presión,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $R$  la constante universal de los gases ideales,  $T$  la temperatura,  $t$  es el tiempo,  $u$  la velocidad en función del tiempo y la posición en el conducto,  $S$  la sección transversal del conducto,  $a$  la velocidad del sonido,  $\gamma$  es el coeficiente adiabático,  $G$  es el término que considera la fricción con las paredes del tubo y  $q$  es el calor transmitido a través de las paredes.

Los métodos de resolución para el sistema de ecuaciones se pueden clasificar de acuerdo a la precisión en la solución, siendo éstos de primer orden (método de las características, Lax-Friedrichs, Lax-Wendroff), segundo orden (Lax-Wendroff de dos pasos, McCormack predictor-

corrector o Godunov) o alta resolución (Flux Corrected Transport-FCT, Total Variation Diminution-TVD); estos últimos permiten obtener soluciones no difusivas y sin sobreoscilaciones, pero con un costo computacional más elevado (Galindo & Hernández, 2011).

Los modelos 1D ofrecen una buena relación precisión-tiempo de cálculo, sin embargo, necesitan información experimental para caracterizar fenómenos que no se resuelven en las ecuaciones de Euler como fricción y transmisión de calor en los conductos, lo cual se ingresa como términos específicos. Adicional estos modelos no calculan el flujo de forma adecuada al tratarse de elementos donde el flujo es claramente no unidimensional, como en las uniones de conductos, difusores, turbinas, entre otros (Galindo & Hernández, 2011).

Los modelos multidimensionales ofrecen la posibilidad de realizar un cálculo detallado del flujo, basándose en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, mediante las técnicas de volúmenes finitos o elementos finitos y se los conoce como cálculo CFD, Computational Fluid Dynamics (Galindo & Hernández, 2011).

El flujo en motores se da en un entorno fluido-dinámico turbulento, para lo cual puede usarse la técnica RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) para la resolución de ecuaciones donde se consideran todas las escalas de la turbulencia y se obtiene valores promedio de las magnitudes fluidas. El modelo de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$ , está basado en el transporte de la energía cinética y de su disipación, siendo el más usado. Otra modelo de turbulencia, LES (Large Eddy Simulation), se basa en resolver las escalas más grandes de turbulencia hasta llegar a un tamaño crítico (Galindo & Hernández, 2011).

ANSYS CFX es una herramienta robusta y rápida que ofrece soluciones precisas y fiables en el análisis de dinámica de fluidos computacional CFD (ANSYS, 2017). Este software es utilizado para modelar el flujo de fluidos y la transferencia de calor en geometrías complejas

(Bisane & Katpatal, 2014). El uso de este software brindará soporte durante el diseño del colector de escape. Entre los parámetros de diseño se requiere resistencia mínima posible en los conductos, geometría adecuada del múltiple para reducir la caída de presión y eliminar la turbulencia innecesaria (McKee, McCullough, Cunningham, Taylor, McDowell, Taylor & McCullough como se citó en Bisane & Katpatal, 2014).

### **Aplicación de simulaciones 1D y 3D en el sistema de escape.**

En el estudio realizado por Vivekanand & Siddaveer (2014), se analizó dos geometrías de colector de escape de configuración 4-1, considerando un diseño base y un modelo optimizado; usando ANSYS CFX, se estableció el análisis de una sola fase de estado estacionario, en condiciones isotérmicas, modelo de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$  RNG (adecuado para altas velocidades y curvaturas fuertes en el dominio), presión de referencia 1 atm, aire como fluido a 350 °C y 1.35 bar, densidad 0.7534 kg/m<sup>3</sup>, viscosidad 3.0927x10<sup>-5</sup> Pa.s y cuatro regímenes de giro diferentes con sus respectivos valores de caudal másico, reduciendo en el diseño modificado la contrapresión de los gases de escape que permitió aumentar la eficiencia volumétrica del motor.

Bisane y Katpatal (2014), en su investigación diseñaron un sistema de escape en el paquete Gambit para pasarlo a ANSYS CFX donde se supone, las condiciones de análisis de estado estacionario, presión estática en la salida, flujo másico y temperatura del fluido a la entrada, superficie adiabática de la pared, condición de no deslizamiento “no slip” en la superficie del dominio, 5% de intensidad de turbulencia en la entrada de aire, modelo de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$ , gas ideal aire como fluido y malla tipo tetraedro. Las condiciones de contorno para un motor convencional de 0.00749 kg/s de flujo másico a 562 K de temperatura en la entrada, mientras la salida se mantiene abierta a 1.325 bar y 353 K. Se obtiene resultados de presión a la entrada de 1.337 bar y 1.82 bar a la salida, y velocidad de 4.439 m/s y 3.172 m/s a la entrada y salida,

respectivamente. Los resultados del estado estacionario y cuasiestacionario son validados mediante el método experimental en el cual se midió la presión, temperatura y se calculó la velocidad y caudal másico en la entrada y salida del sistema de escape, a partir de ello se modifica la geometría hasta encontrar aquella donde la caída de presión es mínima.

El uso efectivo de las ondas de presión de escape ayuda a maximizar la eficiencia volumétrica y el par motor, por lo cual se requiere llevar a cabo simulaciones numéricas, basadas en CFD, que permitan predecir con eficacia el comportamiento bajo condiciones de flujo inestables y proporcionar datos detallados que son difíciles de medir a partir de un motor. Se puede utilizar modelos 1D para reducir las opciones de diseño y complementar el estudio con modelos 3D, para finalmente corroborar las simulaciones con datos experimentales. (Callies, Anderson, & Prucka, 2012). Esta técnica permite ahorrar tiempo computacional, simulando los componentes complejos con buena resolución geométrica por medio de un código 3D y modelando con un código 1D el resto del sistema (Galindo et al., 2011).

Ayala (2015) realiza una optimización del sistema de escape para un ciclomotor de 49 cc y 2T, a partir de la simulación con el programa OpenWAM. Los datos requeridos por el programa fueron extraídos directamente del motor, adquiriendo las medidas geométricas con micrómetros, calibradores, transportador de ángulos y los volúmenes mediante el llenado de cavidades. Dentro de OpenWAM se diagramó el sistema por bloques, especificando los datos en cada uno de ellos y resolviendo con el método numérico TVD. En el estudio se realiza la variación de longitudes de los miembros del escape en un rango especificado, con un incremento de 5 mm y se simulan 50 ciclos de trabajo, ya que, por debajo de los 10 ciclos el programa entrega valores fuera de escala o no representativos. Luego se construyó los sistemas de escape y se probó cada uno mediante tres ensayos en dinamómetro para comparar con los datos obtenidos de la simulación.

Se encontró una desviación de 15% entre las curvas de potencia de simulación y pruebas en el banco de rodillos, debido a que las pérdidas mecánicas no son consideradas en la simulación, sin embargo, la silueta de las curvas, tienen un alto grado de semejanza representando de manera correcta la respuesta del motor. El uso de las herramientas computacionales permitió probar una gran cantidad de longitudes de tubería de escape con lo cual se disminuyó los costos de diseño, tiempo de fabricación y prueba de los escapes con el ciclomotor en el dinamómetro.

Galindo et al. (2011) desarrollaron una metodología de acoplamiento entre el código 1D OpenWAM y el código 3D ANSYS Fluent utilizando el método de las características para el proceso de intercambio de información entre los dos dominios, en donde las condiciones de contorno para cada código son diferentes. En el caso de OpenWAM, las variables de entrada como condiciones de contorno son las invariantes de Riemann, mientras que ANSYS, requiere la presión y temperatura total si el límite de acoplamiento es una entrada o presión estática si es una salida.

Con el modelado 1D se puede evaluar el impacto provocado al modificar un componente en el rendimiento del motor para luego mediante el CFD-3D evaluar los campos de velocidad y temperatura de los gases en el escape, según indican Poggiani, Cimarello y Grimaldi (2015). En su investigación, implementaron el modelo 1D del motor Honda SH 125 de un cilindro y cuatro tiempos en el software AVL Boost, enfocado en analizar las variaciones de torque y potencia mientras se realiza cambios en el sistema de escape. Los resultados 1D fueron usados como datos de entrada en las condiciones de contorno para el análisis 3D del flujo en el silenciador “muffler” con el software STAR-CCM+. Luego de ello se fabricó el mejor prototipo según los datos computacionales para probarlo en un banco de pruebas dinamométrico, recalando la importancia de realizar dicha validación experimental centrada en el rendimiento del motor.

Teodosio, Attilio y Nonatelli (2015) llevan a cabo una metodología para evaluar el rendimiento en un motor, mediante un proceso en el cual se desarrolló el modelo de motor 1D dentro del código GT-Power, del cual se obtienen las condiciones de contorno, presión y temperatura, para usarlas en el modelo 3D dentro de ANSYS Fluent. En este último se aplica el enfoque de RANS, el modelo de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$  y se usa malla de elementos tetraédricos y hexaédricos. A continuación, mediante la simulación 1D se calculó el rendimiento del motor para comparar con los datos experimentales del fabricante. La comparación numérica/experimental de los parámetros de rendimiento, torque y potencia, demuestra que la metodología 1D/3D propuesta es capaz de describir satisfactoriamente el comportamiento general del motor, incluso en ausencia de datos experimentales detallados.

En el estudio paramétrico llevado a cabo por Sammut y Alkidas (2007), se calibró un modelo 1D usando los datos de presión del cilindro medidos experimentalmente en un motor cuatro tiempos y un cilindro con admisión y escape estándar. Los datos de la geometría y coeficientes de descarga medidos se ingresaron a la simulación y una vez que el modelo fue capaz de reproducir los datos de presión, se probó con varios tiempos de duración de apertura de válvulas y longitudes de admisión y escape en regímenes de giro entre 1 200 y 5 000 rpm. Se encontró que la sincronización de válvulas no tiene efecto en la puesta a punto del sistema de admisión, pero si afecta el ajuste o sintonización del escape. Además, cambiando apropiadamente la longitud de admisión-escape, se puede aumentar la capacidad de respiración y por lo tanto el par de un motor, aprovechando la energía en las oscilaciones del flujo.

### **Pruebas dinamométricas.**

Un dinamómetro es un equipo que permite obtener las curvas características del motor, como: par motor, potencia, consumo específico de combustible en función del régimen de giro. Las

curvas características de un MCIA a plena carga se obtienen para la máxima densidad de admisión en régimen continuo, para ello, durante el ensayo se mantiene el mando de control fijo en su posición de máxima demanda (Rodríguez & Nogueira, 2011).

Entre los tipos de dinamómetros que permiten evaluar el comportamiento de un MCIA se tiene el dinamómetro de motor y el dinamómetro de chasis, siendo este último el que permite la medición de potencia y torque en las ruedas motrices del vehículo, presentando los resultados gráficamente (Rosas & Barona, 2011). En el Ecuador las pruebas dinamométricas deben ser realizadas según la norma INEN 960.

La morfología de las curvas características a plena carga en un MCIA (figura 6) se debe al comportamiento con el régimen de las variables de las cuales depende cada parámetro, así entonces, el par depende del rendimiento indicado, rendimiento mecánico y rendimiento volumétrico, mientras que, la potencia depende del par y la velocidad angular del cigüeñal (Rodríguez & Nogueira, 2011).

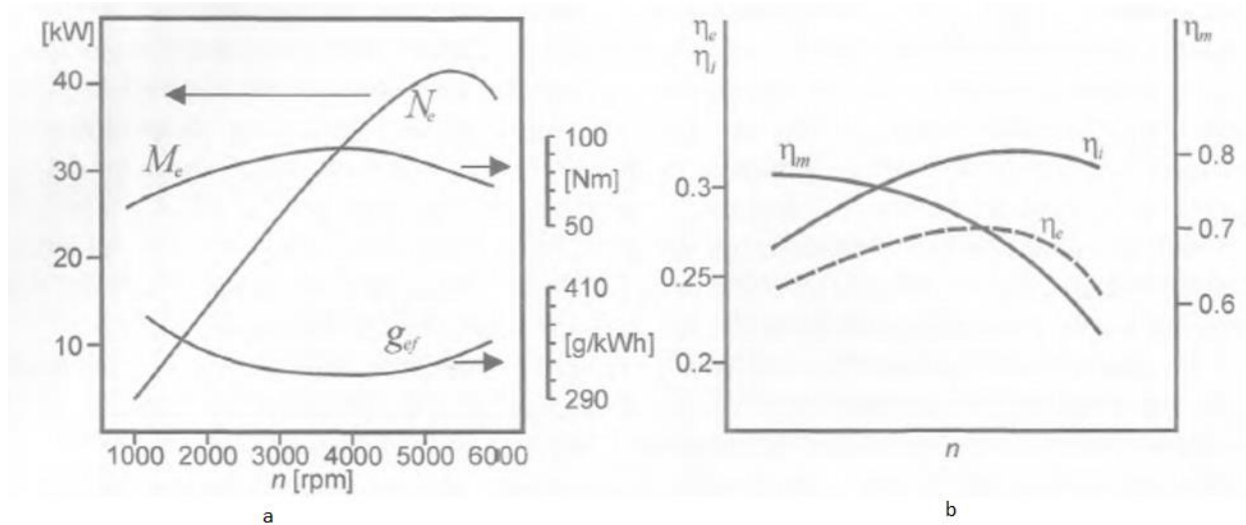


Figura 6. Morfología típica de curvas características a plena carga (a) y variación del rendimiento indicado, mecánico y efectivo (b) de un MCIA. Fuente (Rodríguez & Nogueira, 2011).



## **Método**

### **Tipo de investigación**

Inicialmente se aplica la investigación exploratoria a fin de identificar los métodos para alcanzar mayor rendimiento de un motor de combustión interna, mediante el diseño adecuado del múltiple de escape, así como también para la revisión de normas y ensayos durante el proceso de modelado, construcción y validación de resultados.

A continuación, se utiliza una investigación experimental, manipulando las variables bajo condiciones controladas, para ello, se analiza los efectos de la configuración, longitud y forma de las tuberías del múltiple de escape sobre las curvas de torque y potencia.

### **Método**

En el presente estudio se aplicó el método empírico basado en la observación de las deficiencias en el diseño y construcción de los múltiples de escape elaborados en Ecuador, conjuntamente con la experimentación de varias configuraciones, dimensiones de colectores y proceso de construcción.

Con la simulación computacional en base a métodos matemáticos, se reproducen las condiciones de trabajo del motor y flujo de los gases combustionados mediante el uso de herramientas 1D y 3D, para finalmente validar los resultados experimentalmente.

### **Metodología**

En el trabajo se investiga el comportamiento de dos tipos de configuraciones de múltiple de escape y el colector original mediante el método de simulación computacional 1D/3D y la validación experimental a través de pruebas dinamométricas según la norma INEN 960. En la figura 7 se detalla la metodología utilizada para el estudio.

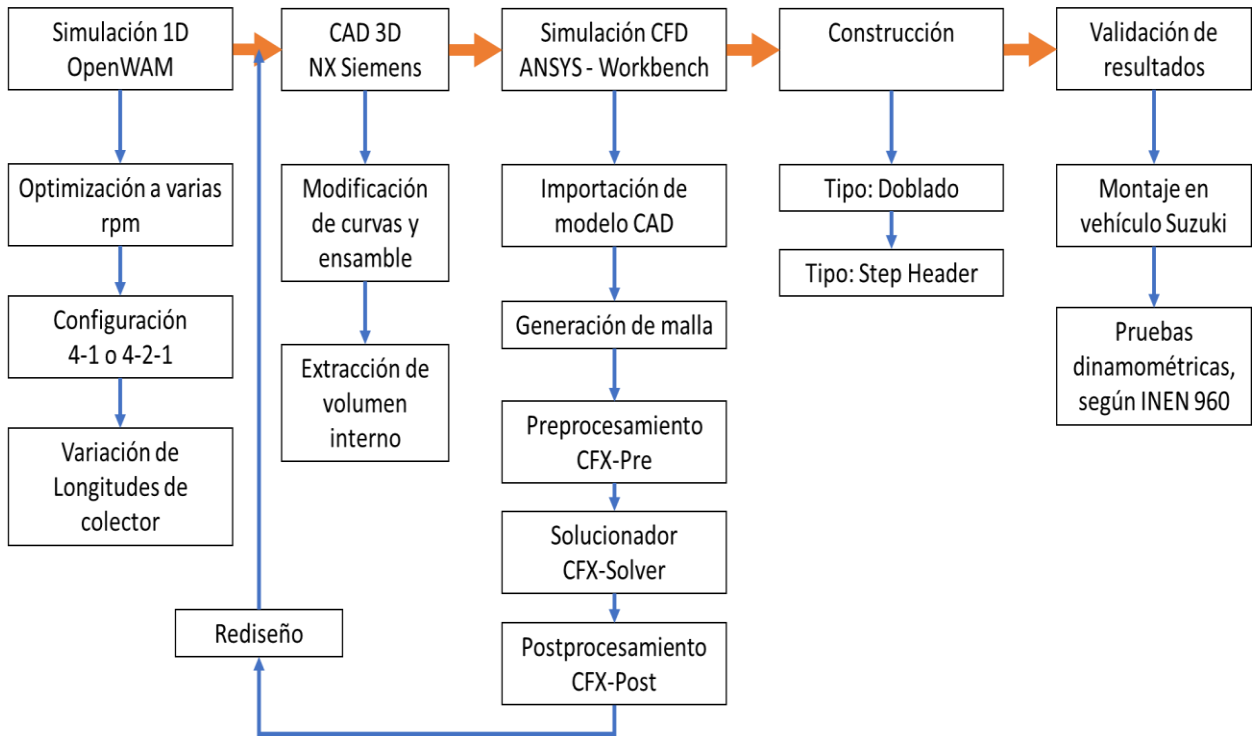


Figura 7. Metodología para optimización del múltiple de escape

### Datos del Vehículo

Se considera un vehículo Suzuki GTi 1.3 Twin-Cam con motor G13B, puesto que es un auto muy usado dentro del automovilismo en Ecuador y Colombia, en campeonatos como el Nacional de Circuitos, Copa CATI, TC 2000, competencias de turismos de calle modificados como Race Day, trepada-drag, sin olvidar que es también un vehículo muy comercial, de gran demanda en nuestro país, por su bajo costo y buenas prestaciones.

Esta versión de Suzuki, trae un múltiple de escape con una configuración 4-2-1 de fábrica.

Las especificaciones del motor del vehículo utilizado se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.  
*Especificaciones del motor*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Motor	G13B, 4 cilindros, 4 tiempos, DOHC
Cilindrada (fiscal)	1298 cm <sup>3</sup>
Diámetro x carrera	74 x 75.5 mm
Relación de compresión	10:1
Potencia	75 kW @ 6500 rpm
Torque	112.5 Nm @ 5000 rpm
Combustible	Gasolina
Sistema de encendido	Bobinas independientes
Orden de encendido	1-3-4-2
Reglaje de encendido - básico APMS	$6 \pm 1/850$ °APMS/rpm
Sistema de combustible	MPF-i
Medidor de aire	Flujo masa de aire (MAF)
Régimen de ralentí	$850 \pm 50$ rpm
Temperatura de trabajo de motor	80°C
Lambda a ralentí incrementado ( $\lambda$ )	0.97-1.03
Presión de compresión	11-14 bar
Relación Aire-Combustible AFR	14.7:1

Fuente: Autor, Ficha técnica Suzuki Swift 1.3 GTi 16V, Autodata.

En la tabla 2 se muestran las especificaciones de las válvulas y conductos de admisión y escape en el cabezote del motor G13B con doble árbol de levas.

Tabla 2.  
*Especificaciones de válvulas y conductos*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>			
Número de válvulas	16			
	Admisión		Escape	
Diámetros de válvulas	29.1 mm		24.9 mm	
Longitud de los conductos de válvulas	85 mm		85 mm	
Diámetro del conducto	44 mm		35 mm	
Elevación de válvula (lift)	7.493 mm		7.493 mm	
	AAA	RCA	AAE	RCE
Sincronización de válvulas	8° APMS	36° DPMI	42° APMI	10° DPMS

Fuente: Autor, (Suzuki Motor Co. Ltd, 1988), (Ivan Tighe Engineering Pty Ltd, 2017)

### Cálculos introductorios

A partir de datos suministrados por trabajos previos, se definieron las dimensiones referenciales de longitud y diámetros requeridos para el múltiple de escape, los cuales se detallan a continuación.

#### Determinación de dimensiones.

Según Gillieri (2007), en su libro de preparación de motores para competición, la longitud del colector se determina según la ecuación 5.

$$Lc = \frac{13\ 000 * Ge}{n * 6} [cm] \quad (5)$$

Donde, Lc: es longitud en cm que debe tener el colector de escape y corresponde al valor medido desde la válvula, de modo que se debe descontar de dicha cifra la longitud del conducto de escape en el cabezote, Ge: es el valor en grados que corresponde a la fase de escape según el diagrama de distribución, n: las revoluciones por minuto máximas del motor, y los valores 6 y 13 000, son constantes.

El diámetro de los tubos se determina por medio de la ecuación 6, considerando Vc como la cilindrada unitaria en cm<sup>3</sup>. El valor que se obtiene del diámetro, se aplica para colectores rectos, por lo cual es necesario añadir un 10 % a la cifra calculada para compensar las curvaturas.

$$\varnothing = 2 * \sqrt{\frac{Vc * 2}{Lc * \pi}} [cm] \quad (6)$$

Para la unión de los tubos se sugiere una caja de expansión, como la mostrada en la Figura 8, que permita la unión de los gases en un solo flujo.

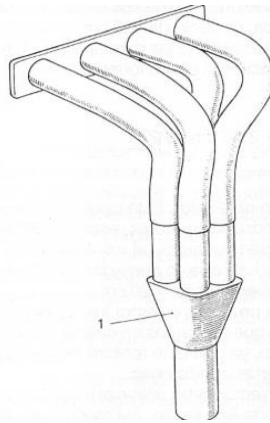


Figura 8. Forma de la unión entre los conductos. Fuente (Gillieri, 2007)

El diámetro del trayecto final del tubo de escape se calcula por la ecuación 7, donde  $V_t$  es la cilindrada total en  $\text{cm}^3$ , mientras que la longitud se aconseja un valor múltiplo de la dimensión del colector  $L_c$  (incluyendo el conducto de la culata).

$$\phi_{Te} = 2 * \sqrt{\frac{V_t}{L_c * \pi}} \text{ [cm]} \quad (7)$$

En otros estudios de sistemas de escape, como los realizados por Jawad, Biggs, & Klein (2002), y Kanawade y Siras (2015), se han usado las relaciones establecidas por Heisler en el libro “Advanced engine technology”. Según Heisler (2002), la longitud del conducto primario ( $L$ ) se puede encontrar por la ecuación 8, en donde,  $C$ : es la velocidad del sonido a través de la tubería de escape (se sugiere 518 m/s a 400 °C),  $n$ : las revoluciones por minuto del motor y  $\theta_t$ : el ángulo de desplazamiento del cigüeñal durante el cual la onda de presión en el escape viaja por el colector (ángulo sugerido 120°).

$$L = \frac{\theta_t * C}{0.012 * n} \text{ [mm]} \quad (8)$$

La longitud del conducto primario determina el tiempo que le tomará a la onda de presión creada en el escape, viajar por el colector y regresar, así que entre más largo el tubo o recorrido, mayor es el tiempo requerido; por otra parte, el tiempo que se mantiene abierta la válvula

disminuye a medida que aumenta las revoluciones, por lo que un tubo más largo funcionará mejor a velocidades de motor menores (Jawad et al., 2002).

En cuanto al diámetro de la tubería, si es muy pequeño se incrementan las pérdidas de flujo y se genera una alta contrapresión, en cambio si es demasiado grande, la velocidad en la tubería será insuficiente para promover un buen barrido de gases; por ello se recomienda que en cada unión de conductos se incremente 0.25 pulgadas (6.35 mm) al diámetro del tubo, pudiendo ser mayor en la configuración 4-1 ya que une las cuatro líneas (Jawad et al., 2002).

### **Efectos de la configuración del múltiple de escape.**

En torno a la configuración de escape, Gillieri (2007) menciona que el tipo 4-1 consigue un aumento de potencia a regímenes de giro altos, mientras que, a bajas revoluciones existe pérdida, de allí su aconsejable uso en vehículos de pista; también indica que la configuración 4-2-1, trabaja mejor en bajos regímenes de giro mientras en los altos es menos favorable.

Un colector 4-1 ayuda a disminuir la turbulencia, reducir pérdidas de flujo y teóricamente tiene el mayor caudal por lo que trabaja mejor en altas revoluciones; el colector 4-2-1 360°, une en los primarios los cilindros desfasados 360° según el orden de encendido, creando dos conexiones principales, donde se genera ondas de expansión en las uniones de primarios y secundarios, y una tercera onda es reflejada desde la válvula de escape cerrada en el cilindro desfasado 360° hacia el conducto abierto de escape, por tanto, el desplazamiento de estas tres ondas crea un rango de revoluciones más amplio para el barrido; el colector 4-2-1 180°, agrupa los cilindros desfasados 180° según el orden de encendido, es más fácil de unir entre cilindros pero provoca problemas con las ondas generadas (Jawad et al., 2002).

Se analizó la configuración 4-2-1 y 4-1 y sus efectos en las curvas de potencia y torque. En la configuración 4-1 se unió los cuatro cilindros en un colector, mientras que, para la configuración

4-2-1 se unió los cilindros 1-4 y 2-3, según el diagrama de orden de encendido y fases del Suzuki GTi mostrado en la tabla 3.












Tabla 3.  
*Diagrama de orden de encendido y fases.*

Cilindro	0° a 180°	180° a 360°	360° a 540°	540° a 720°
1	Trabajo	Escape	Admisión	Compresión
2	Escape	Admisión	Compresión	Trabajo
3	Compresión	Trabajo	Escape	Admisión
4	Admisión	Compresión	Trabajo	Escape

### Simulación 1D

Para la simulación 1D se utilizó el programa OpenWAM, el cual trabaja con un sistema de bloques donde se ingresan los datos de cada componente del motor, desde la admisión de aire fresco hasta la salida de gases de combustión, por lo tanto, se establece el tipo de motor, número de cilindros, válvulas, conductos de admisión-escape y conexiones entre sistemas conforme al modelo que se requiere analizar. En la tabla 4 se indican los bloques utilizados en la simulación 1D.

Tabla 4.  
*Bloques utilizados en OpenWAM*

Tipo	Bloque	Definición
Motores		Motor 4T
		Cilindro 4T
Nodos de unión		Ramificación
		Unión entre dos conductos
		Extremo a la atmósfera
Conexiones		Unión a depósito
		Válvula de admisión
		Válvula de escape
Elementos 0D		Cámara de volumen constante
Otros		Condiciones iniciales
		Línea de conexión

Las condiciones de trabajo y geometría para el motor 4T modelado, corresponden a un motor de encendido provocado (MEP), como se indica en la tabla 5.

Tabla 5.  
*Condiciones de trabajo y geometría del motor*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tipo de motor	MEP
Condición de operación	Estacionario
Número de ciclos	10
Velocidad de motor (rpm)	2500 a 7500
Poder calorífico del combustible (kJ/kg)	41870
Densidad de combustible (kg/m <sup>3</sup> )	854
Longitud de biela (mm)	120
Carrera de pistón (mm)	75.5
Diámetro de cilindro (mm)	74
Relación de compresión	10
Distancia entre válvulas (mm)	37
Orden de encendido	1-3-4-2

Se establecieron los parámetros de cálculo y el modelo utilizado en el bloque de ejecución “EJEC”, como se indica en la tabla 6.

Tabla 6.  
*Definición de modelo y parámetros de ejecución*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Método de cálculo	Independiente
Número de ciclos de convergencia o duración de simulación	10
Presión ambiente (bar)	1
Temperatura ambiente (°C)	20
Tipo de cálculo	Simplificado
Permitir cálculos externos	No
Sustancia de combustible	Gasolina
Método numérico	Lax Wendroff
Sub-modelo	Without correction

Los datos asignados a las válvulas de admisión y escape se muestran en la tabla 7.



Tabla 7.

*Parámetros de válvulas*

<b>Parámetro</b>	<b>Admisión</b>	<b>Escape</b>
Diámetro de válvula (mm)	29.1	24.9
Ángulo de apertura de válvula (°)	352	138
Control de velocidad	Motor	Motor
Relación de velocidad	1	1
Diámetro de referencia para cálculo Cd (mm)	29.1	24.9

En el sistema de admisión del motor se consideran tres secciones: la primera hace referencia al ingreso de aire fresco al múltiple de admisión, la segunda los conductos desde el múltiple de admisión al cabezote y la tercera los conductos dentro del cabezote, como se indica en la figura

9.

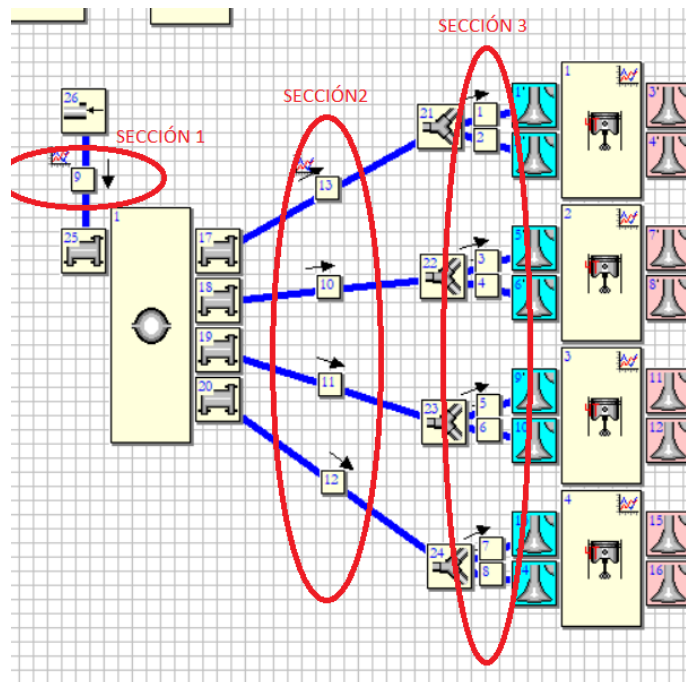


Figura 9. Secciones del sistema de admisión

De acuerdo a la sección, se establecen las condiciones y parámetros de los conductos a través de la ventana de ingreso de datos, disponible para cada elemento, como se indica en el ejemplo de la figura 10.

Defining duct number 9

Property	Value
Spatial mesh (m)	0,05
Duct type	Intake pipes
Wall temperature calculation	Constant
Duct roughness (mm)	0,15
Initial wall temperature (°C)	20
Initial gas temperature (°C)	20
Initial gas pressure (bar)	1
Initial gas velocity (m/s)	0
Heat transfer correction coefficient	1
Friction correction coefficient	1
Nº of intercooler ducts	1

Note: Duct roughness (mm)

Data Geometry Numerical method Composition

Accept Cancel

Figura 10. Ingreso de parámetros en conductos de admisión

El espacio de malla, permite definir los pasos de cálculo utilizados en el conducto; mientras menor sea este valor, se alcanza mayor precisión, pero con mayor tiempo de resolución. Se sugiere espacios pequeños en conductos principales o críticos y valores mayores (en el orden de los cm) en los conductos secundarios.

En la sección de cálculo de temperatura de pared se seleccionó constante, puesto que las otras opciones se utilizan cuando se dispone de un *intercooler*. Para la temperatura se utiliza en la admisión el mismo valor introducido en el bloque de ejecución “EJEC”.

Dentro de geometría, se puede definir el diámetro y longitud del conducto; al variar el diámetro de entrada respecto a la de salida se considera un tubo cónico. Se seleccionó el método numérico de resolución TVD para los conductos de escape y Lax Wendroff para la admisión.

Los datos empleados en cada sección del sistema de admisión se resumen en la tabla 8.

Tabla 8.

*Parámetros de conductos de admisión*

Parámetro	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Espacio de malla (m)	0.05	0.05	0.005
Tipo de conducto	Tubería de admisión	Tubería de admisión	Tubería de admisión
Cálculo de temperatura de pared	Constante	Constante	Constante
Rugosidad de conducto (mm)	0.15	0.15	0.15
Temperatura inicial de pared (°C)	20	20	20
Temperatura inicial del gas (°C)	20	20	20
Presión inicial del gas (bar)	1	1	1
Velocidad inicial del gas (m/s)	0	0	0
Diámetro de entrada (mm)	73.2	44	44
Longitud (mm)	31	250	85
Diámetro de salida (mm)	73.2	44	29.1
Método numérico	Lax Wendroff	Lax Wendroff	Lax Wendroff

En el sistema de escape, se consideraron cuatro secciones para asignar los parámetros respectivos, como se indican en la figura 11. La sección A: hace referencia a los conductos de escape en el cabezote; sección B: el tubo de escape intermedio entre el múltiple y la salida; sección C: tubería final del escape; sección M: múltiple de escape, en esta sección se realizó el análisis al modificar dimensiones y formas.

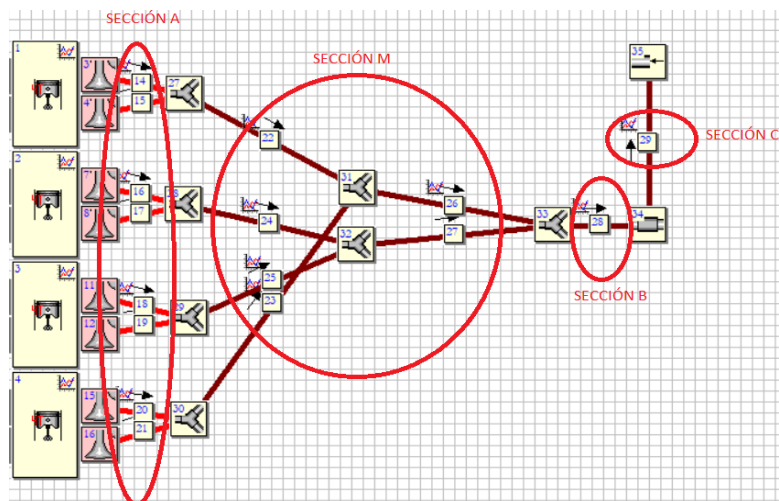


Figura 11. Secciones del sistema de escape

Para cada elemento del sistema de escape se estableció las condiciones de mallado, tipo de conducto, dimensiones, entre otros, en la ventana de ingreso de datos de conductos mostrada en la figura 12.

Property	Value
Inlet diameter (mm)	24.9

Nº	Length (mm)	Outlet diameter (mm)
1	85	35

Figura 12. Ingreso de parámetros en conductos de escape

Los parámetros ingresados en los conductos de acuerdo a cada sección se establecen en la tabla 9.

Tabla 9.

*Parámetros del sistema de escape*

Parámetro	Sección A	Sección B	Sección C
Espacio de malla (m)	0.005	0.005	0.05
Tipo de conducto	Puerto de escape	Tubería de escape	Tubería de escape
Cálculo de temperatura de pared	Constante	Constante	Constante
Rugosidad de conducto (mm)	0.15	0.15	0.15
Presión inicial del gas (bar)	1	1	1
Diámetro de entrada (mm)	24.9	47.8	47.8
Longitud (mm)	85	1100	1200
Diámetro de salida (mm)	35	47.8	47.8
Método numérico	TVD	Lax Wendroff	Lax Wendroff
Submodelo	1	Without correction	Without correction

Dentro del modelado 1D se analizó dos tipos de configuraciones de múltiple de escape, manteniendo constante el resto de sistemas y secciones mencionados anteriormente. En la configuración 4-1, mostrada en la figura 13, se unen los conductos de escape de los cuatro cilindros en un solo colector.

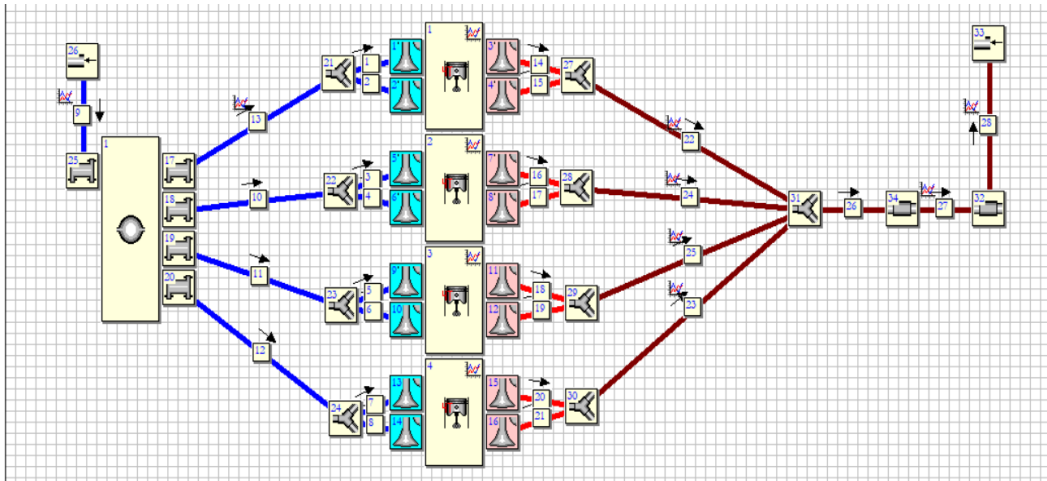


Figura 13. Configuración 4-1 en OpenWAM

En la configuración 4-2-1, mostrada en la figura 14, se conectan los cilindros desfasados  $180^\circ$  según el orden de encendido; en este caso inicialmente se unen los cilindros 1-4 y 2-3, para luego unirse un colector final.

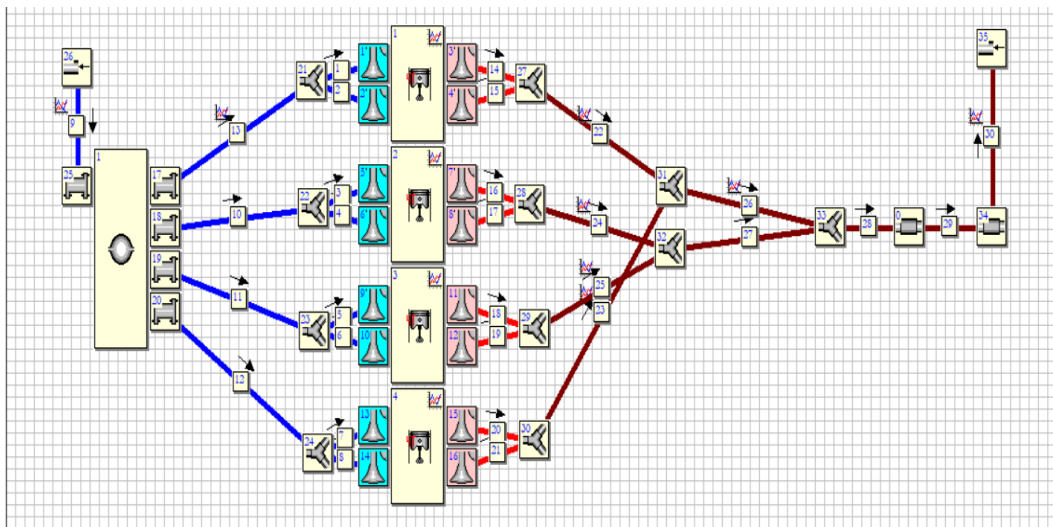


Figura 14. Configuración 4-2-1 en OpenWAM

OpenWAM posee una herramienta para estudios paramétricos como se muestra en la figura 15, la misma que permitió variar las velocidades de giro del motor y longitudes de la tubería del múltiple de escape a fin de encontrar la dimensión y configuración que brinde mayor rendimiento en el motor G13B Twin Cam. En esta opción, cada columna corresponde a un caso, por tanto, el *software* realiza una simulación por cada caso de estudio, de acuerdo a los datos anotados en ellos.

Element	Number	Property	Actual value	Include	Case number1	Case number2	Case number3	Case number4	Case number5	Case number6	Case number7	Case number8
4T Engine	0	Initial engine speed (rpm)	6500 (n)	Yes	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	7800
Duct	22	Length (mm)	312 (Lp1)	Yes	300	300	300	300	300	300	300	300
Duct	23	Length (mm)	258,77 (Lp4)	Yes	300	300	300	300	300	300	300	300
Duct	24	Length (mm)	276,92 (Lp2)	Yes	300	300	300	300	300	300	300	300
Duct	25	Length (mm)	243,91 (Lp3)	Yes	300	300	300	300	300	300	300	300
Duct	26	Length (mm)	317,85 (Ls1)	Yes	300	300	300	300	300	300	300	300
Duct	27	Length (mm)	317,85 (Ls2)	Yes	300	300	300	300	300	300	300	300

Figura 15. Variables para estudio paramétrico

En la tabla 10 se presenta los datos empleados para el múltiple de escape del sistema original y las configuraciones estudiadas. En el caso del múltiple original los datos de longitud y diámetros fueron medidos sobre la pieza disponible. Para la configuración 4-2-1 se realizó un estudio paramétrico inicial a 6 500 rpm, modificando las variables de longitud del colector en un rango de 250 a 400 mm, tanto para primario como para secundario; de las conjugaciones generadas se seleccionó la que alcanza mayor potencia para simularla en el rango de 2 500 a 7

500 rpm. La configuración 4-1 se evaluó en un rango de 5 500 a 7 500 rpm, variando la longitud de la tubería de 500 a 800 mm con pasos de 50 mm; con la dimensión que el motor alcanzó mejor rendimiento, se obtuvo las curvas de potencia y torque en el rango de 2 500 a 7 500 rpm.

Tabla 10.

*Parámetros de la tubería del múltiple de escape*

Parámetro	Original (configuración 4-2-1)		Configuración 4-1	Configuración 4-2-1	
	Primarios	Secundarios		Primarios	Secundarios
Espacio de malla (m)	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
Tipo de conducto	Tubería de escape	Tubería de escape	Tubería de escape	Tubería de escape	Tubería de escape
Cálculo de temperatura de pared	Constante	Constante	Constante	Constante	Constante
Rugosidad de conducto (mm)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Diámetro de entrada (mm)	35	31	35	35	41.45
Longitud (mm)	L1: 312.00 L2: 276.92 L3: 243.91 L4: 258.77	317.85	500 a 800	250 a 400	250 a 400
Diámetro de salida (mm)	35	31	35	35	41.45
Método numérico	Lax Wendroff	Lax Wendroff	Lax Wendroff	Lax Wendroff	Lax Wendroff
Submodelo	Without correction	Without correction	Without correction	Without correction	Without correction

Con la arquitectura del motor completa, se seleccionó los elementos de los que se requiere los resultados instantáneos y promedio de las variables disponibles, tanto para motor como para conductos.

En la figura 16 se muestran los resultados promedio seleccionados en cuanto al motor; principalmente la potencia, torque efectivo y velocidad de motor, son los valores que permitieron obtener las curvas características del motor.

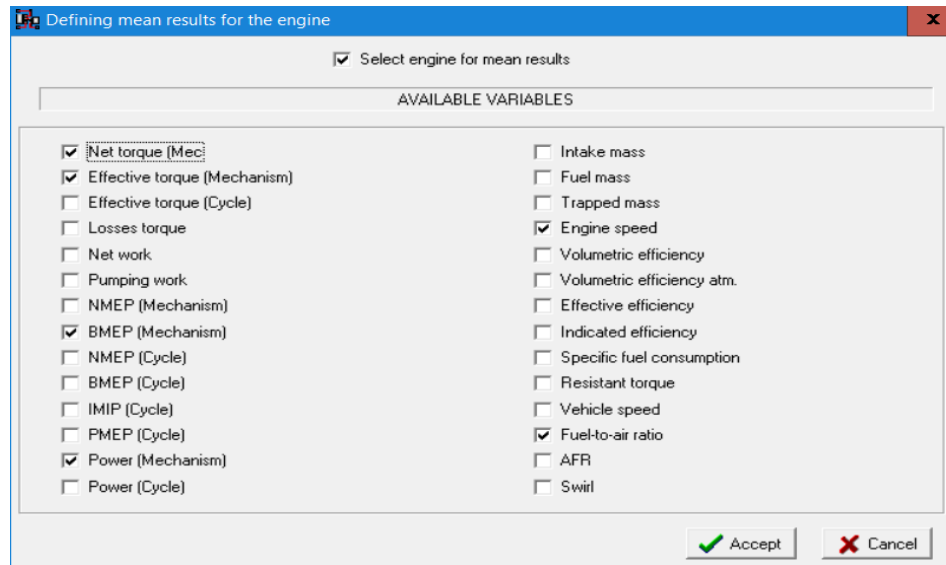


Figura 16. Variables para resultados promedio del motor 4T

Por otra parte, entre los resultados instantáneos en cada cilindro son importantes los valores de presión, temperatura y flujo másico en las válvulas de escape, puesto que estos valores se utilizan en la simulación tridimensional. La figura 17, muestra la selección de los variables instantáneas disponibles en los resultados del cilindro número 1.

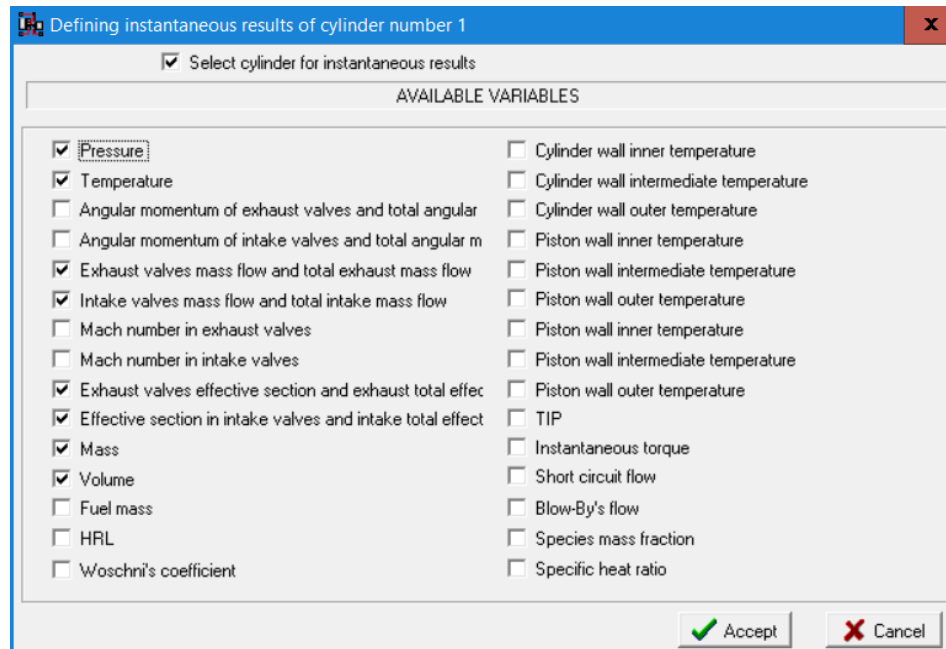


Figura 17. Variables para resultados instantáneos en los cilindros del motor



Previo a la simulación se debe guardar el modelo en dos extensiones: \*.PCS hace referencia al archivo del modelo de trabajo o preprocesamiento, y \*.WAM para compilar, con ello en la ventana de control de ejecución es posible iniciar la simulación verificando el tiempo y avance de la misma.

## **Simulación 3D**

### **Modelado 3D.**

El modelado 3D se realizó en el software NX Siemens, el cual permite la obtención del volumen interno del múltiple para utilizarlo como el dominio del fluido en la simulación CFD.

Para el diseño de los múltiples de escape se considera las dimensiones del cabezote, espacio físico disponible en el vehículo por la parte delantera e inferior del motor y las longitudes obtenidas del software OpenWAM.

Dentro del diseño se buscó reducir el número de curvaturas de los tubos y hacerlas con radios de giro amplios. Entre más cantidad de dobleces, curvaturas pronunciadas y bordes ásperos dentro del tubo, resulta mayor la fricción interna de los gases de escape y se traduce en menor eficiencia del sistema de escape (Mohiuddin, Rahamn, & Dzaidin, 2007).

### **Mallado.**

Para el mallado se utilizaron elementos tetraédricos, con un tamaño de 0.003 - 0.005 m. La precisión de los resultados está ligada a la calidad de la malla. Para la verificación de los elementos de la malla se utilizó el factor de *Skewness* (oblicuidad), que se mide en una escala del 0 al 1, representando el valor 0 la mayor calidad posible y 1 la peor. En la tabla 11 se presenta los rangos del factor de oblicuidad para determinar la calidad del mallado según el software Ansys.

Tabla 11.  
*Rangos de Skewness y calidad de elemento*

<b>Skewness</b>	<b>Calidad de mallado</b>
1	Degradado
$0.9 < 1$	Malo
$0.75 - 0.9$	Pobre
$0.5 - 0.75$	Razonable
$0.25 - 0.5$	Bueno
$>0 - 0.25$	Excelente
0	Equilátero

Nota: Calidad de mallado según Ansys 18.0

### **Configuración en CFX-Pre.**

Para la simulación CFD se utilizó el paquete estudiantil del software ANSYS CFX, basado en el método de volúmenes finitos.

Se realizaron dos tipos de estudios para flujo tridimensional: estático y transitorio. En los múltiples de escape el flujo es transitorio, siendo las propiedades del fluido dependientes no sólo de la ubicación sino también del tiempo (Cuadrado, Agudelo, & Sánchez, 2008). Por lo cual, el análisis transitorio fue necesario para observar el efecto de los gases combustionados de un cilindro a otro en función del orden de encendido del motor; así como también, permitió el ingreso variable de flujo másico en función del tiempo para cada cilindro, respondiendo a un comportamiento real de los gases dentro del múltiple, lo cual es limitado en la solución estacionaria.

### **Análisis estático.**

En la tabla 12 se muestran los parámetros seleccionados para el dominio y control de *solver* en el análisis estático. Se consideró aire como gas ideal para la definición del fluido, el modelo de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$ , condición de no deslizamiento en las paredes y un criterio de convergencia de  $1 \times 10^{-4}$ .

Tabla 12.

*Parámetros utilizados en el estudio estático*

Parámetro	Condición
Tipo de análisis	Estático
Material del dominio	Aire (Gas ideal)
Presión de referencia	1 [atm]
Transferencia de calor	Energía térmica
Modelo de turbulencia	$\kappa - \varepsilon$
Condición de pared	Sin deslizamiento (No Slip Wall)
Criterio de convergencia	Tipo: / Objetivo: $1 \times 10^{-4}$

Las condiciones determinadas en la tabla 12 se ingresan durante el preprocesamiento en CFX, al definir los parámetros del dominio mediante los ajustes básicos y el modelo del fluido, como se muestra en la figura 18.

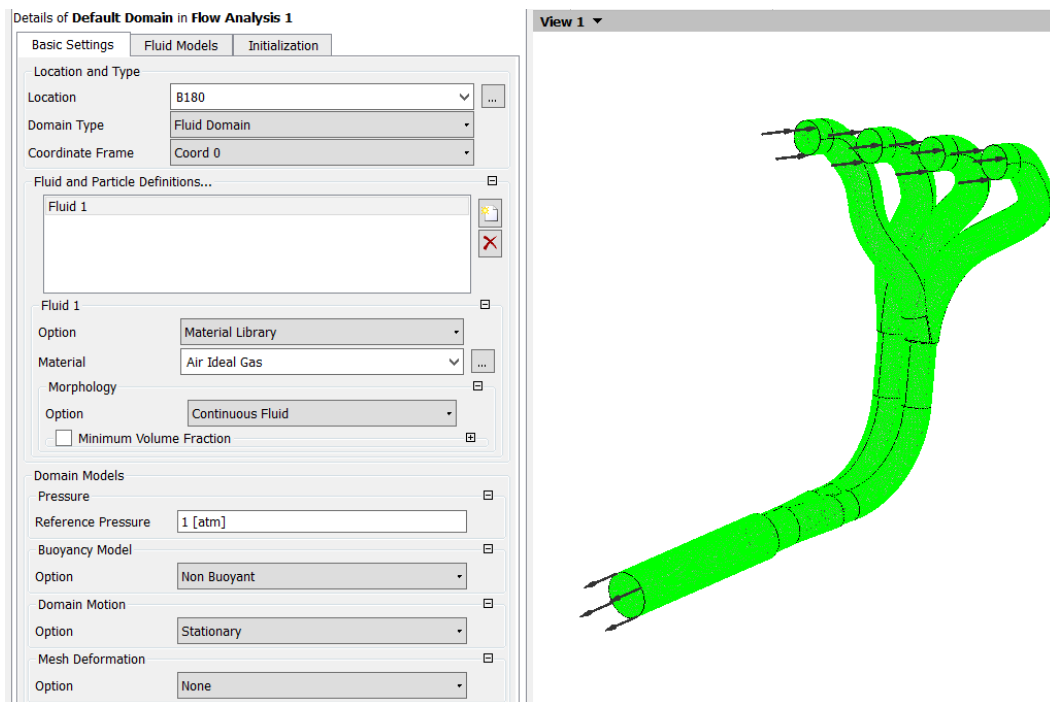


Figura 18. Parámetros del dominio en estudio estático

Las condiciones de contorno seleccionadas para el estudio estático, fueron tomadas del análisis unidimensional en OpenWAM, correspondientes a la velocidad de giro del motor de 6500 rpm, como se muestran en la tabla 13.

Tabla 13.

*Condiciones de frontera para análisis estático*

Condición de frontera	Tipo	Valor
Ingreso	Presión total	1.18 [bar]
	Intensidad de turbulencia	5%
	Temperatura estática	973 [K]
Salida	Presión estática	1.038 [bar]

En la figura 18, se observa la inclusión de las condiciones de contorno en el ingreso del múltiple de escape en la interfaz de CFX.

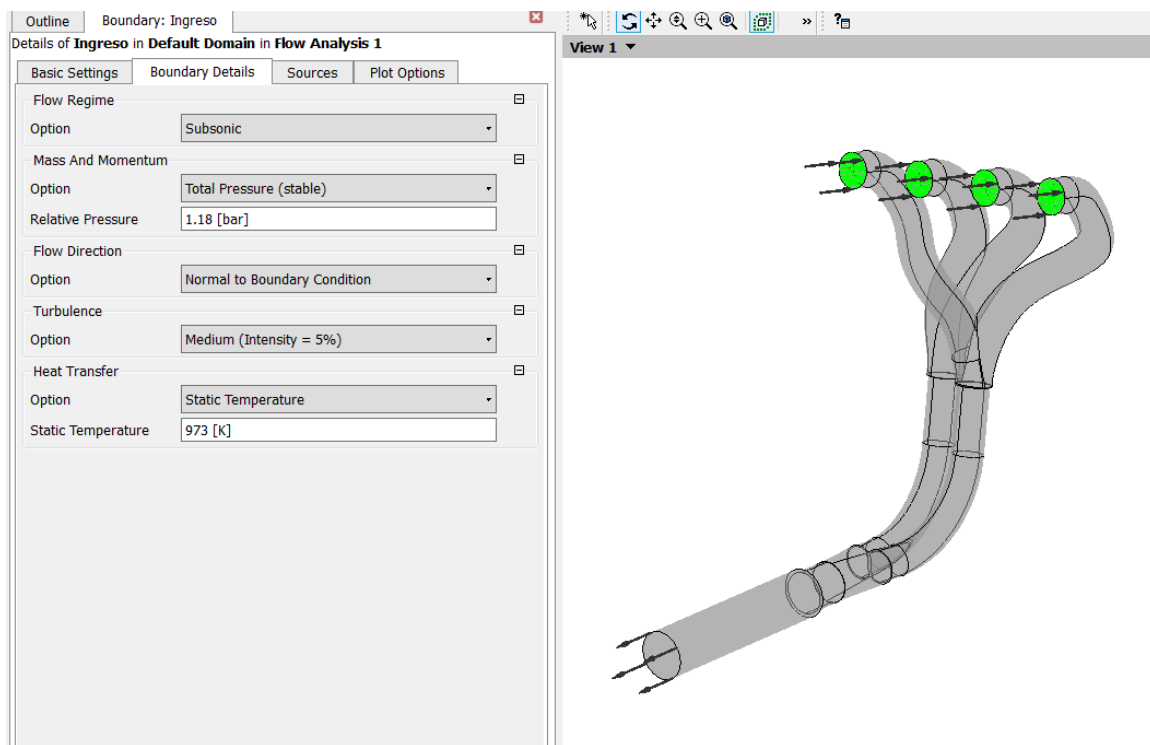


Figura 19. Condiciones de ingreso en estudio estático

### ***Análisis transitorio.***

En el análisis transitorio se definieron los parámetros indicados en la tabla 14, para el dominio y control del *solver*.

Tabla 14.

*Parámetros utilizados en el estudio transitorio*

Parámetro	Condición
Tipo de análisis	Transitorio
Material del dominio	Aire - Gas ideal
Presión de referencia	1 [atm]
Transferencia de calor	Energía térmica
Modelo de turbulencia	$\kappa - \epsilon$ .
Condición de pared	Sin deslizamiento (No Slip Wall)
Temperatura de inicialización de dominio	293 [K]
Criterio de convergencia	Tipo: RMS / Objetivo: $10^{-4}$

Los parámetros del dominio se ingresan según los datos de la tabla 14, en la ventana mostrada en la figura 20.

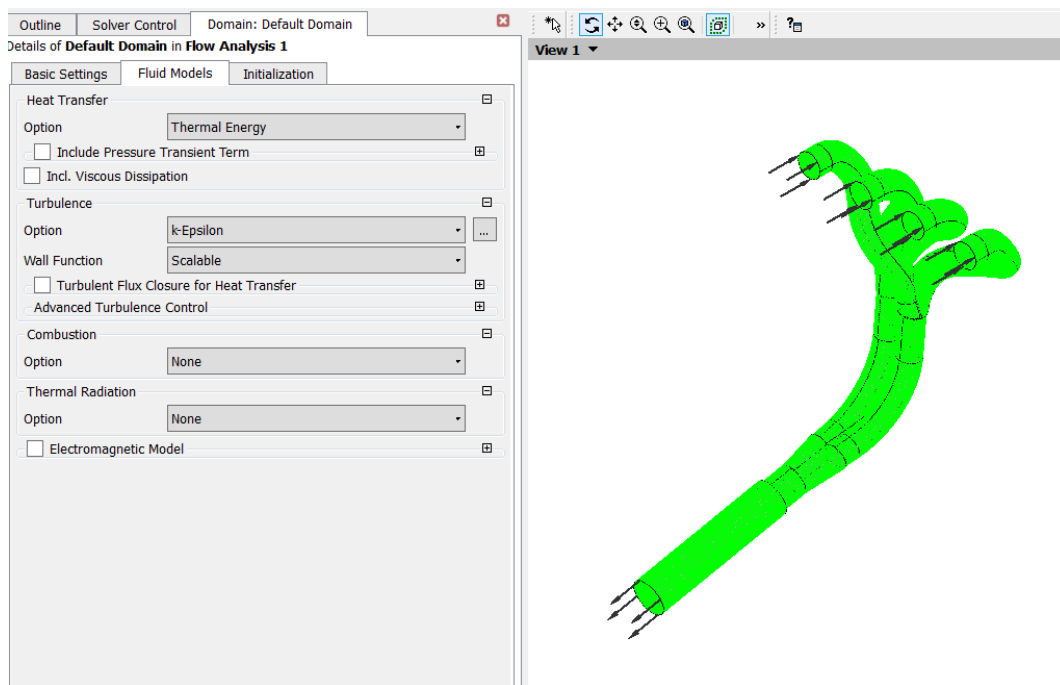


Figura 20. Parámetros del dominio en estudio transitorio

Las condiciones seleccionadas para el control del *solver* se presentan en la figura 21.

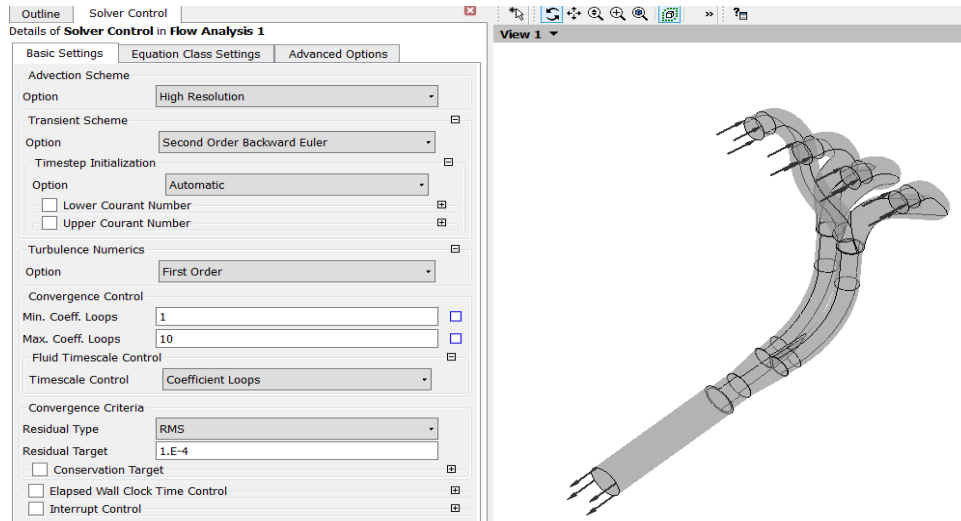


Figura 21. Condiciones de control de solver

Los resultados instantáneos obtenidos con OpenWAM, permitieron definir los tiempos de duración de estudio transitorio y pasos (*timesteps*) como se detallan en la tabla 15.

Tabla 15.  
Condiciones de tiempo en estudio transitorio

Caso	Tiempo de duración [s]	Pasos de tiempo [s]
Múltiple original	$18.2882 \times 10^{-3}$	$1.44 \times 10^{-4}$
Configuración 4-1	$18.240 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-4}$
Configuración 4-2-1	$18.2882 \times 10^{-3}$	$1.44 \times 10^{-4}$

En la figura 22 se observa la ventana de ingreso de las condiciones del tipo de análisis y tiempo de estudio.

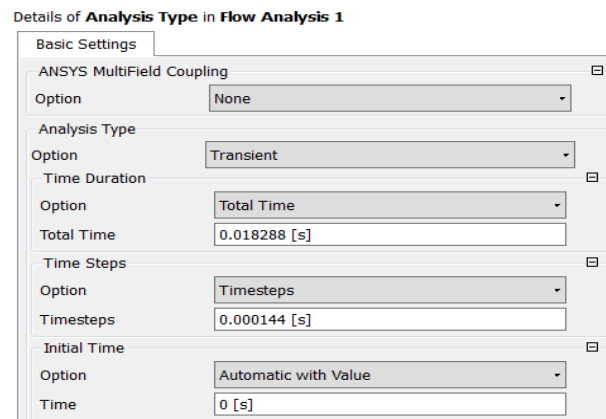


Figura 22. Ajustes del tipo de análisis

Las condiciones de frontera al ingreso del múltiple consisten en los valores de gasto másico instantáneo en el escape para cada cilindro. Los datos se obtuvieron de la simulación 1D y se ingresaron en ASYS como funciones, de la forma presentada en la figura 23, permitiendo tener ingreso variable de flujo másico en función del tiempo. La condición a la salida se utilizó presión estática de 1.038 bar.

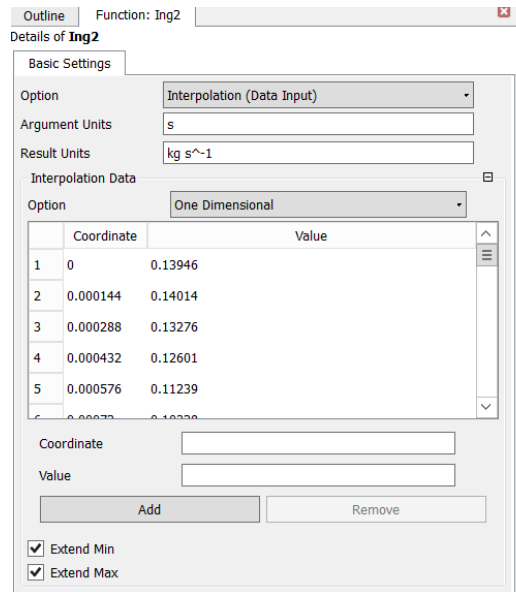


Figura 23. Condiciones de frontera en el ingreso del múltiple de escape

La frecuencia de salida para los resultados se definió para cada paso de tiempo (*every timestep*), lo que permite grabar los datos de la simulación cada 0.000144 s en el caso de la configuración 4-2-1 y cada 0.000228 s para la configuración 4-1.

### Construcción de Múltiple de Escape

La construcción del múltiple de escape se lo realizó por dos métodos, denominados A y B.

El tipo A, consiste en el doblado de los tubos, donde se observó el estrechamiento de la sección transversal en las curvaturas. Para este proceso se cortó los tubos de la longitud especificada en el diseño y se dobló de acuerdo a los ángulos requeridos mediante una dobladora de tubos hidráulica, como se muestra en la figura 24.



Figura 24. Dobladora de tubos hidráulica

El tipo B se elaboró mediante la unión de secciones de tubos previamente doblados sin variar la sección transversal conocido como *step header*. Los tubos que mantienen el diámetro uniforme, como los curvados con un mandril de doblado, mejoran el rendimiento respecto las tuberías con dobleces inadecuados o que presentan arrugamiento (Mohiuddin et al., 2007). Para ello se adquirió tubos doblados a 75°, 90° y 105°, que luego fueron cortados en secciones de acuerdo al tamaño requerido en cada curvatura según el diseño 3D. En la figura 25 se muestra un ejemplo de sección cortada a 80° respecto al centro de la curva, con la ayuda de una plantilla de ángulos.

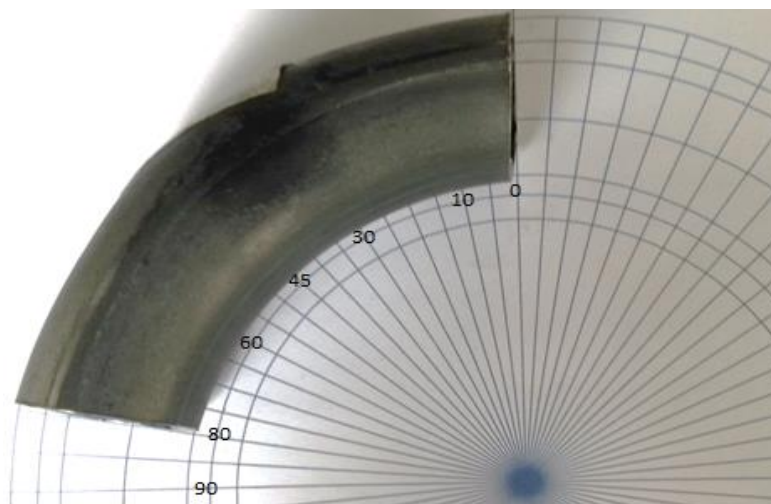


Figura 25. Sección de tubería doblada, corte a 80°



El espesor de la tubería para el sistema de escape debe ser mayor o igual a 0.9 mm, medidos en las zonas o áreas que no poseen dobladura, según indica la FIA (2017). Los múltiples se construyeron en acero ASTM A500 de 1.5 mm de espesor, cuyas propiedades se indican en el anexo 3. Para evitar la corrosión los múltiples fueron recubiertos con una capa de pintura de alta temperatura.

### **Pruebas Dinamométricas**

Para determinar la potencia y torque experimentalmente, se utilizó el dinamómetro de rodillos marca MAHA (Maschinenbau Haldenwang) LPS 3000, desarrollando los ensayos a 2 800 msnm y 73 755 Pascales. Las especificaciones técnicas del banco dinamométrico se detallan en el anexo 4.

El dinamómetro usado está compuesto por los siguientes elementos (Rosas & Barona, 2011):

- Juego de rodillos
- Freno de corrientes parásitas
- Chasis del dinamómetro
- Cardán
- Bomba hidráulica
- Cilindros hidráulicos
- Ventiladores
- Sistema de adquisición de datos

Las pruebas dinamométricas se llevaron a cabo según la norma INEN 960, basada en la ISO 1585 y la ISO 3173, obteniendo las curvas características del vehículo mediante cuatro ensayos con cada múltiple de escape analizado, aplicando el protocolo de pruebas planteado por Rocha y Zambrano (2015), de la siguiente manera:

1. Verificar la dimensión de las ruedas igual o mayor a rin 13 pulgadas y que no supere la capacidad de peso definida por el fabricante
2. Ubicar el vehículo en el banco dinamométrico.
3. Revisar el perfil del neumático y verificar que esté libre de piedras o partículas que puedan desprenderse.
4. Descender el elevador para que las ruedas se apoyen sobre los rodillos.
5. Verificar la alineación de las ruedas con respecto a los rodillos del dinamómetro, haciéndolas girar a una velocidad máxima de 20 km/h.
6. Asegurar el vehículo con cintas para evitar su salida de los rodillos.
7. Verificar la seguridad en el área de prueba.
8. Introducir los datos técnicos del vehículo en el software LPS 3000.
9. Verificar la relación de transmisión del vehículo, debe ser 1:1.
10. El motor debe estar a la temperatura normal de funcionamiento.
11. Encender el ventilador de refrigeración del banco de pruebas LPS 3000.
12. Iniciar la prueba de medición.
13. Acelerar el vehículo con el pedal a fondo en la marcha de prueba hasta alcanzar el corte de rpm.
14. Cuando se alcanza el corte de rpm se debe pisar el embrague, con la marcha puesta. Entonces el banco de pruebas desacelera hasta detenerse y el resultado se muestra en la pantalla.

En la figura 26 se observa el vehículo de pruebas en el dinamómetro de chasis LPS 3000.



Figura 26. Vehículo de pruebas en dinamómetro de chasis LPS 3000

Para que los datos sean comparables, independientemente de las condiciones climáticas durante los ensayos, los valores de potencia medidos se convierten en valores de referencia determinados mediante un factor de corrección según las normas ISO 1585, JIS D 1001 o SAE J 1349 (Dietsche & Klingebiel, 2005). El factor de corrección  $\alpha_a$ , está dado por la ecuación 9.

$$\alpha_a = \left(\frac{99}{P_p}\right)^{1.2} * \left(\frac{T_p}{298}\right)^{0.5} \quad (9)$$

Donde  $P_p$  y  $T_p$ , corresponden a la presión barométrica y temperatura en el lugar de la prueba, respectivamente.

## Resultados

### Cálculos introductorios

El múltiple de escape original posee una configuración 4-2-1, cuyas dimensiones se presentan en la tabla 16, detalladas como longitud de primario (Lp1 a Lp4), secundario (Ls1 y Ls2) y en el total la suma de estos valores. Por otra parte, de las ecuaciones de Gillieri y Heisler se obtuvo la longitud total que deberían tener los tubos del múltiple, según estos autores, al calcularlos para una velocidad de giro de motor de 6 500 rpm. Los resultados mostrados en la tabla 16, sirvieron únicamente como valores de referencia inicial en la selección de rangos de dimensiones de estudio durante el proceso de optimización del múltiple de escape.

Tabla 16.

*Dimensiones de referencia iniciales para múltiple de escape.*

Dimensiones		Original 4-2-1	Gillieri	Heisler
		mm		
Longitud de colector	Primario	Lp1: 312.00	-	-
		Lp2: 276.92		
		Lp3: 243.90		
		Lp4: 258.77		
	Secundario	Ls1: 317.85	-	-
		Ls2: 317.85		
	Total	L1: 629.85 L2: 594.77 L3: 561.75 L4: 576.62	688.33	796.92
Diámetro interno del colector	Primario	35.1	35.97	35.1
	Secundario	31.1		41.45
Diámetro al final del colector		41	46.23	47.5

### Simulación 1D

Una vez concluido el proceso de simulación (figura 27), OpenWAM crea dos archivos de resultados con extensión \*.DAT: el primero "AVG" que corresponde a los valores promedio medidos en cada ciclo de cálculo y el otro "INS" que corresponde a valores instantáneos

medidos en el último ciclo de cálculo. Los valores encontrados fueron tratados con Excel para obtener las curvas de torque y potencia según el régimen de giro del motor, además de las curvas de flujo másico instantáneo en el escape.

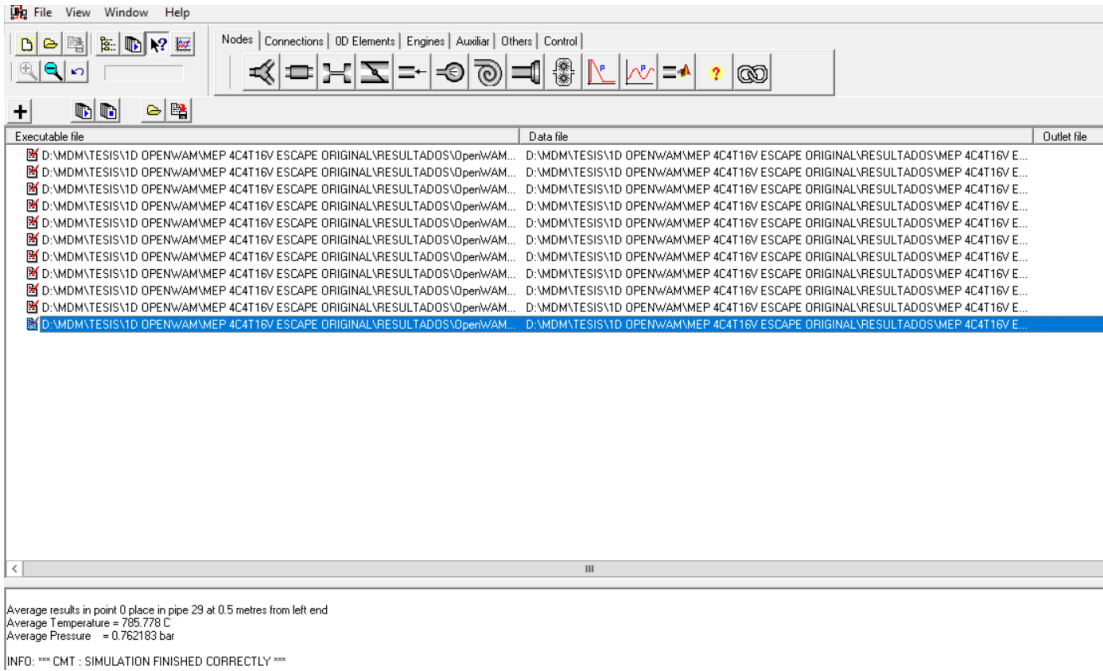


Figura 27. Finalización del proceso de simulación en OpenWAM

### Obtención de resultados con múltiple de escape original.

Los resultados del estudio paramétrico en OpenWAM, para cada régimen de giro de motor y la configuración de escape original, se muestra en la tabla 17 y la figura 28.

Tabla 17.

*Resultados obtenidos en OpenWAM de potencia y torque para múltiple original*

<b>n [rpm]</b>	<b>Potencia [kW]</b>	<b>Torque [Nm]</b>
2500	25.1088	95.9087
3500	38.5623	105.212
4500	45.4166	96.377
5500	58.5065	101.581
6000	60.148	95.7285
6500	62.5167	91.8447
7000	62.3627	85.0743
7500	61.5981	78.4291

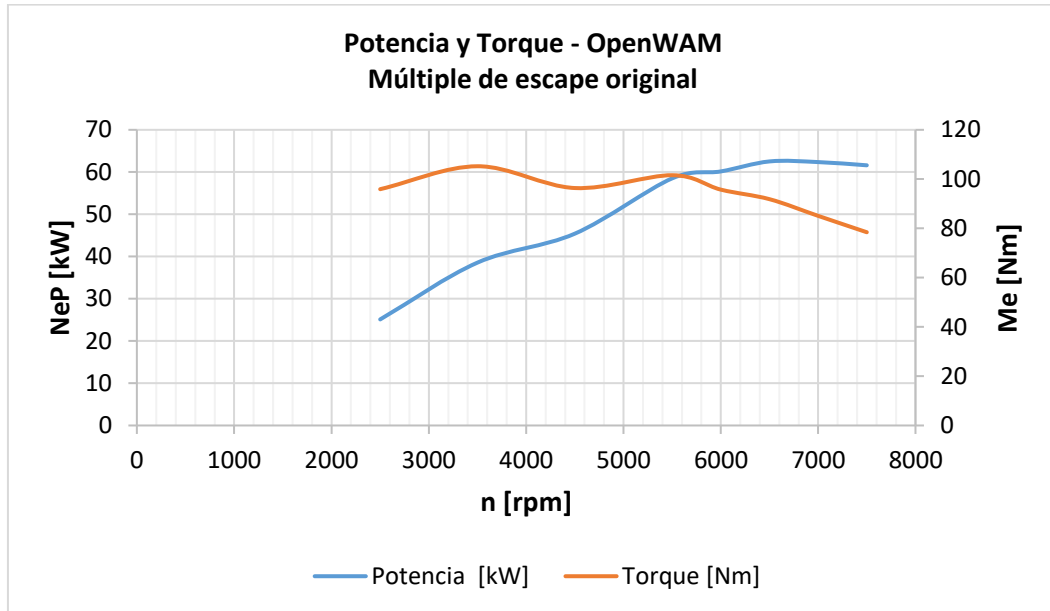


Figura 28. Curvas de potencia y torque para múltiple original

Usando los resultados instantáneos de la simulación 1D, generados durante el último ciclo de trabajo del motor a 6 500 rpm, se obtuvo las curvas del gasto másico en las válvulas de escape para cada cilindro del motor, como se muestra en la figura 29.

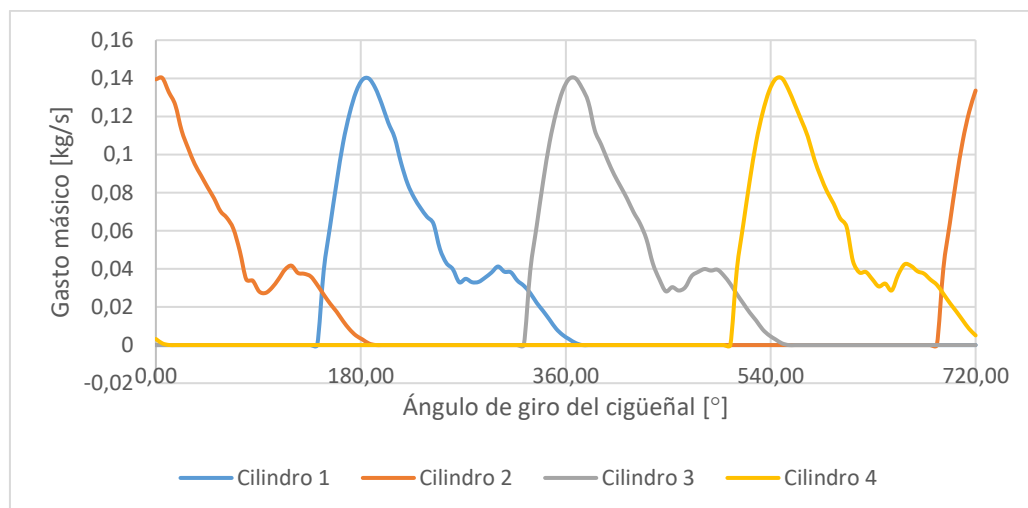


Figura 29. Gasto másico instantáneo en las válvulas de escape del motor con múltiple de escape original

**Obtención de resultados con múltiple de escape configuración 4-2-1.**

Los resultados de potencia al relacionar las dimensiones de colector primario y secundario se muestran en la tabla 18.

Tabla 18.

*Potencia obtenida al relacionar las longitudes de colector primario y secundario*

<b>Primario [mm]</b>	<b>Secundario [mm]</b>			
	<b>250</b>	<b>300</b>	<b>350</b>	<b>400</b>
250	62.5593	62.4839	62.8389	62.9789
300	62.3173	62.4285	62.5195	62.8519
350	62.1426	62.3651	62.883	63.4021
400	61.4877	61.8281	63.0216	62.446

Nota: Los resultados de potencia se muestran en kW, obtenidos a 6 500 rpm. Valor máximo 63.4021 kW.

De la tabla 18 se observa que en la configuración 4-2-1 se alcanza mayor potencia, usando una longitud para colector primario de 350 mm y secundario de 400 mm. Con estas dimensiones se obtuvo los resultados de rendimiento del motor en el rango de 2 500 a 7 500 rpm, como se indica en la tabla 19 y figura 30.

Tabla 19.

*Resultados obtenidos en OpenWAM de potencia y torque para múltiple de escape 4-2-1*

<b>n [rpm]</b>	<b>Potencia [kW]</b>	<b>Torque [Nm]</b>
2500	25.4212	97.1018
3500	38.612	105.348
4500	43.7725	92.888
5500	59.4174	103.163
6000	61.3021	97.5653
6500	63.4021	93.1455
7000	64.7469	88.3268
7500	63.0016	80.2162

Nota: Longitud de colector primario 350 mm y secundario 400 mm.

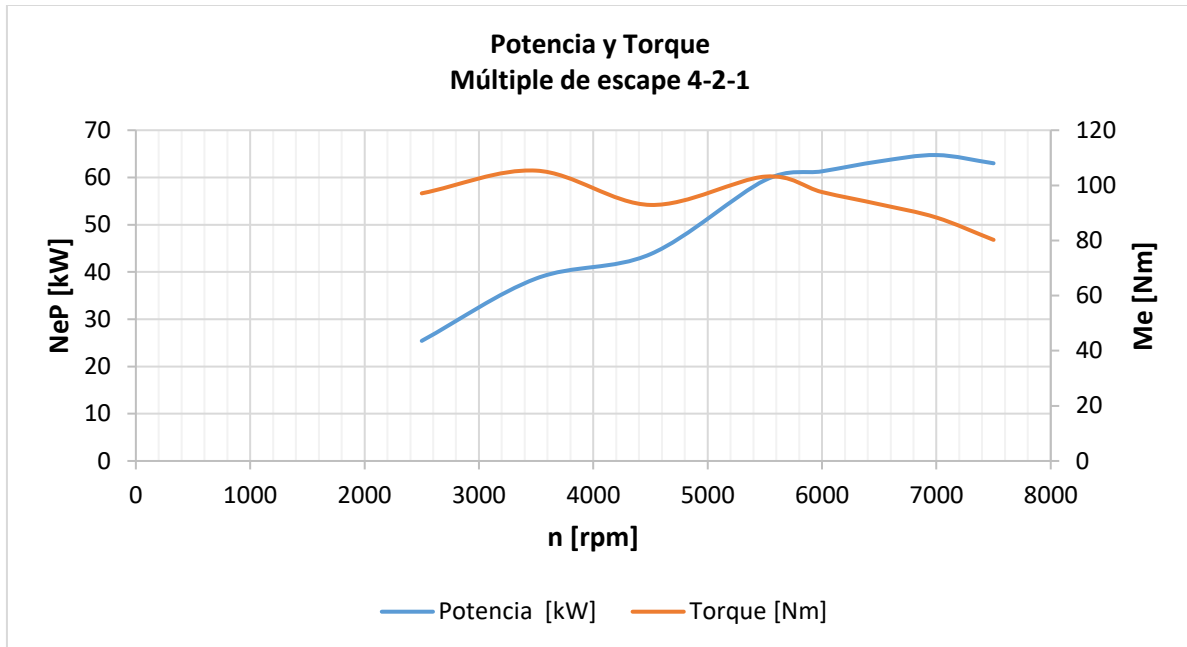


Figura 30. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-2-1

Las curvas del flujo másico instantáneo en el escape para el motor a 6 500 rpm con configuración 4-2-1 y longitudes de colector primario 350 mm y secundario 400 mm, se observan en la figura 31.

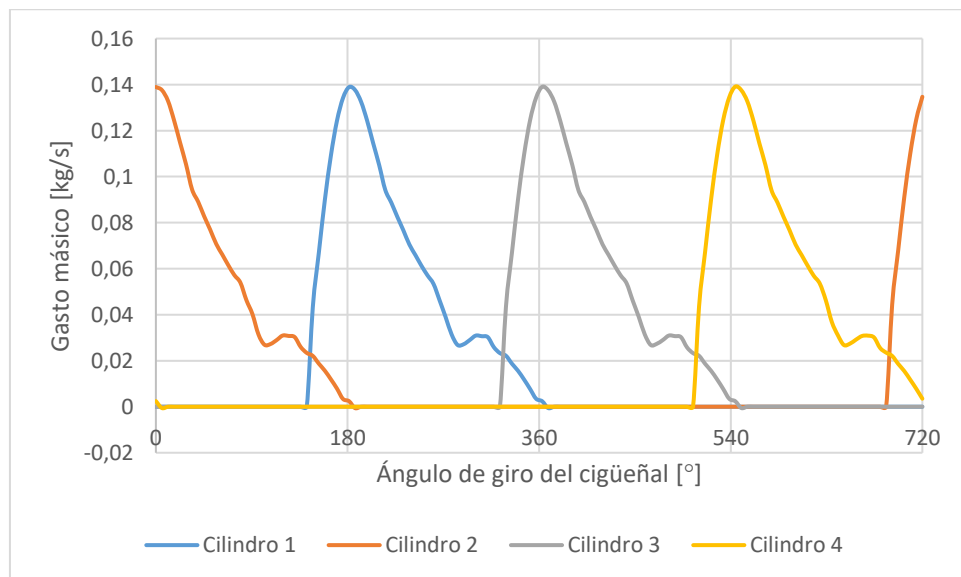


Figura 31. Gasto másico instantáneo en las válvulas de escape del motor con múltiple 4-2-1



**Obtención de resultados con múltiple de escape configuración 4-1.**

En la tabla 20 se muestran los resultados de potencia al variar las longitudes del colector de 500 a 800 mm en pasos de 50 mm y los correspondientes a los valores calculados de las relaciones de Gillieri y Heisler.

Tabla 20.

*Potencia obtenida al variar las longitudes del colector en pasos de 50 mm*

<b>n</b> [rpm]	<b>Longitud del colector [mm]</b>								
	<b>500</b>	<b>550</b>	<b>600</b>	<b>650</b>	<b>700</b>	<b>750</b>	<b>800</b>	<b>688.33</b>	<b>796.92</b>
5500	57.49	57.54	57.54	57.42	58.33	58.93	59.14	58.02	58.50
6000	59.96	59.55	59.78	60.71	60.87	59.90	59.86	59.79	60.09
6500	60.88	62.24	61.63	62.58	62.07	61.79	62.22	62.41	62.78
7000	63.87	64.96	65.17	66.15	65.88	65.46	66.10	64.67	66.45
7500	69.24	68.43	66.43	68.05	67.95	69.26	67.68	68.32	67.64

Nota: Los resultados de potencia se muestran en kW.

Los valores de potencia más aceptables, en el rango de revoluciones analizado, se encuentran entre las longitudes de 650 a 800 mm. En busca de la longitud más adecuada se calculó los resultados en pasos de 25 mm en el rango indicado de la tabla 21.

Tabla 21.

*Potencia obtenida al variar las longitudes del colector en pasos de 25 mm*

<b>n</b> [rpm]	<b>Longitud del colector [mm]</b>						
	<b>650</b>	<b>675</b>	<b>700</b>	<b>725</b>	<b>750</b>	<b>775</b>	<b>800</b>
5500	57.42	57.95	58.33	57.97	58.93	58.99	59.14
6000	60.71	60.08	60.87	60.00	59.90	60.44	59.86
6500	62.58	62.92	62.07	62.54	61.79	62.63	62.22
7000	66.15	64.88	65.88	65.10	65.46	66.41	66.10
7500	68.05	67.56	67.95	68.37	69.26	68.83	67.68

Nota: Los resultados de potencia se muestran en kW.

Con el colector de longitud 775 mm se tiene un crecimiento progresivo y uniforme de potencia, que se mantiene entre los valores más elevados durante todo el rango de potencia, a diferencia de las otras longitudes que presentan variación entre altos y bajos. Los resultados de torque y potencia para esta dimensión se detallan en la tabla 22 y la figura 32.

Tabla 22.

Resultados obtenidos en OpenWAM de potencia y torque para múltiple de escape 4-1

n [rpm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
2500	24.8084	94.761
3500	38.5881	105.283
4500	45.4759	96.5029
5500	58.9949	102.429
6000	60.4359	96.1867
6500	62.6338	92.0168
7000	66.4128	90.5994
7500	68.8312	87.6385
7800	68.1796	83.4702

Nota: Longitud de colector 775 mm.

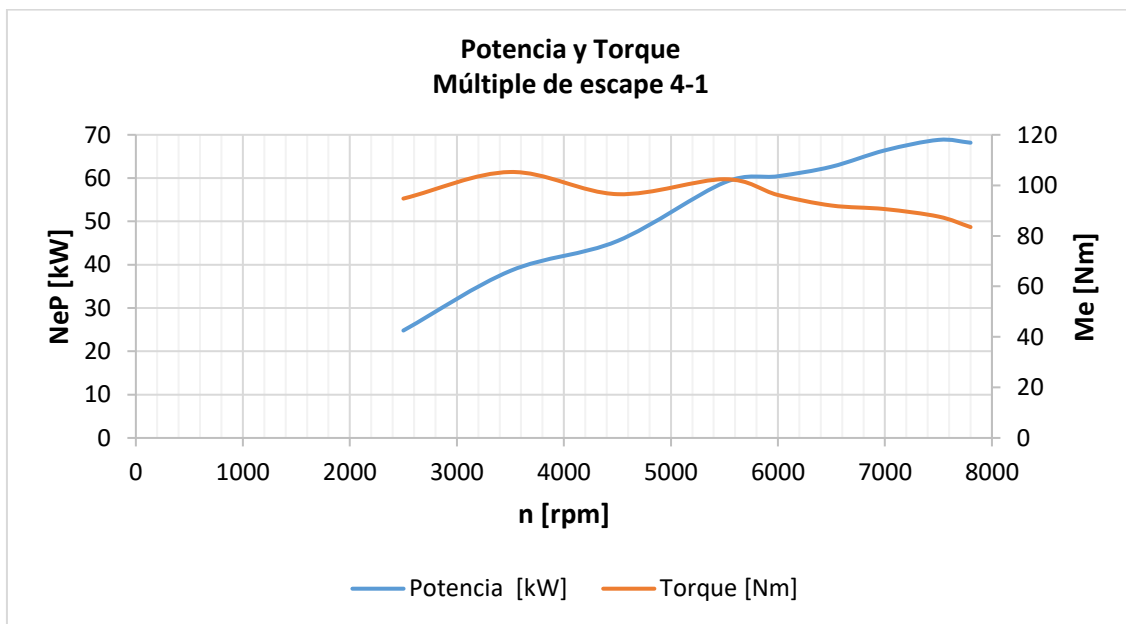


Figura 32. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-1

Los resultados instantáneos de la simulación del motor a 6 500 rpm, permitieron obtener las curvas de gasto másico en las válvulas de escape, mostradas en la figura 33.

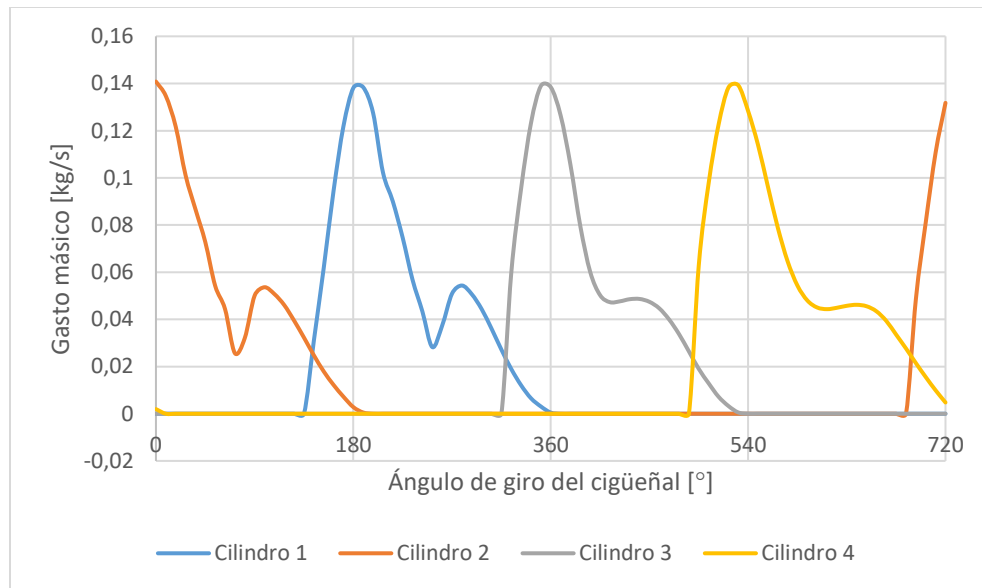


Figura 33. Gasto másico instantáneo en las válvulas de escape del motor con múltiple 4-1

### Simulación 3D

En la simulación tridimensional se evaluó el múltiple de escape original y los diseños propuestos según los parámetros de velocidad y presión, a partir de los datos proporcionados por la simulación unidimensional en OpenWaM.

#### Modelado.

##### *Múltiple de escape original.*

En la figura 34 se muestra el modelo 3D del múltiple de escape original y el volumen interno correspondiente al dominio para el análisis CFD.

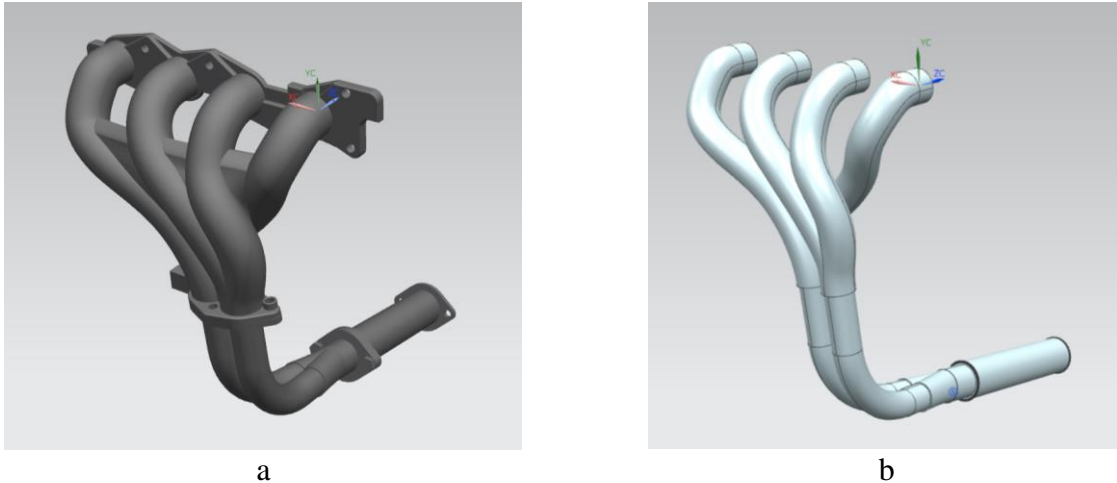


Figura 34. Múltiple de escape original: (a) modelado 3D, (b) volumen interno

#### ***Múltiple de escape configuración 4-2-1.***

El múltiple de escape de configuración 4-2-1 se diseño según las dimensiones optimizadas en OpenWAM y corresponde a las longitudes de 350 mm y 400 mm para colectores primarios y secundarios, respectivamente. En la figura 35 se observa el modelo 3D y el volumen extriádo del mismo.

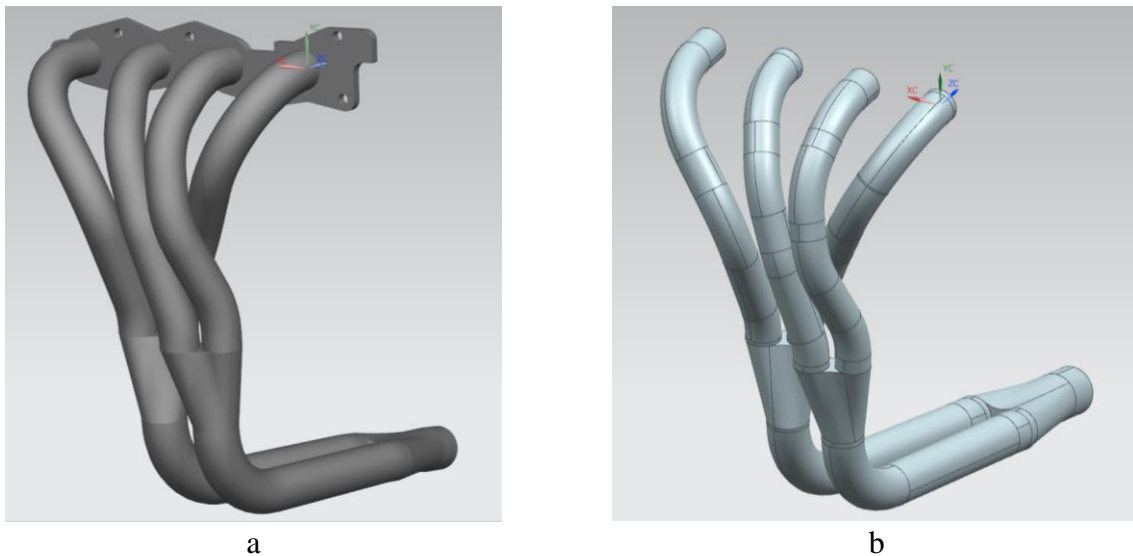


Figura 35. Múltiple de escape 4-2-1: (a) modelado 3D, (b) volumen interno

***Múltiple de escape configuración 4-1.***

En la figura 36 se observa el diseño realizado para el múltiple de escape 4-1 y su volumen interno, manteniendo las longitudes de la tubería del colector de 775 mm y diámetro interno de 35 mm.

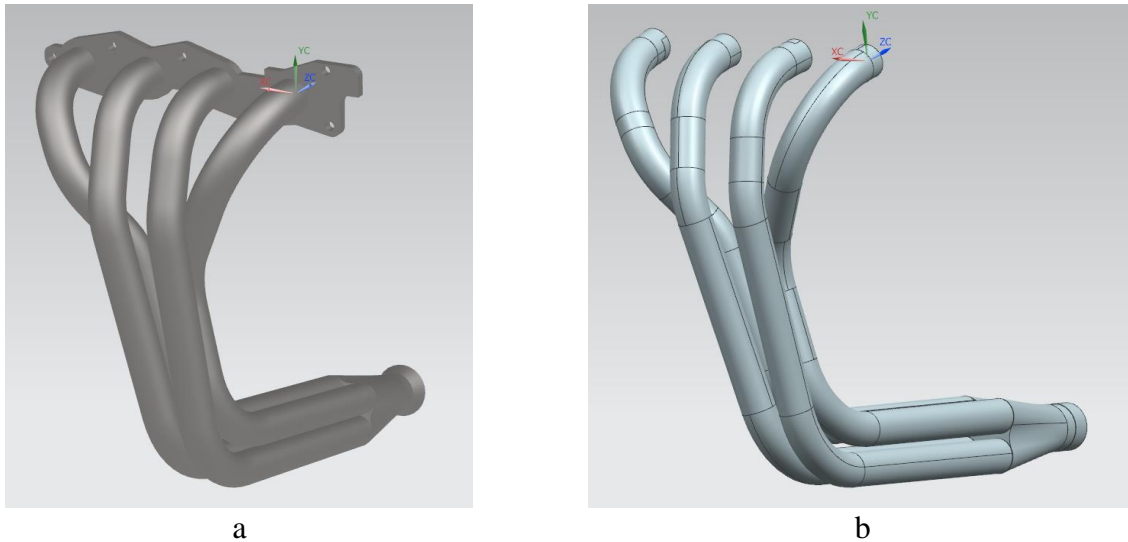


Figura 36. Múltiple de escape 4-1: (a) modelado 3D, (b) volumen interno

**Mallado.*****Múltiple de escape original.***

En el caso del flujo en el múltiple de escape original se tiene una malla con 74 241 nodos, 384 033 elementos y un valor de 0.21366 para el factor *Skewness* que indica una elevada calidad de mallado, como se observa en la figura 37.

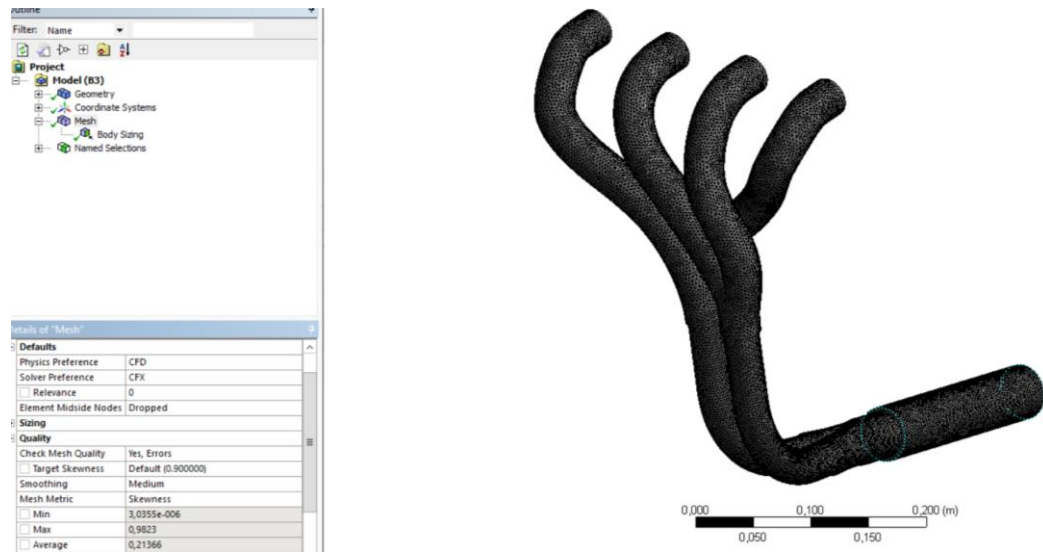


Figura 37. Mallado del dominio en el múltiple de escape original

#### ***Múltiple de escape configuración 4-2-1.***

La malla del múltiple de escape 4-2-1, mostrada en la figura 38, posee 40 760 nodos, 200 327 elementos y un factor *Skewness* de 0.21928.

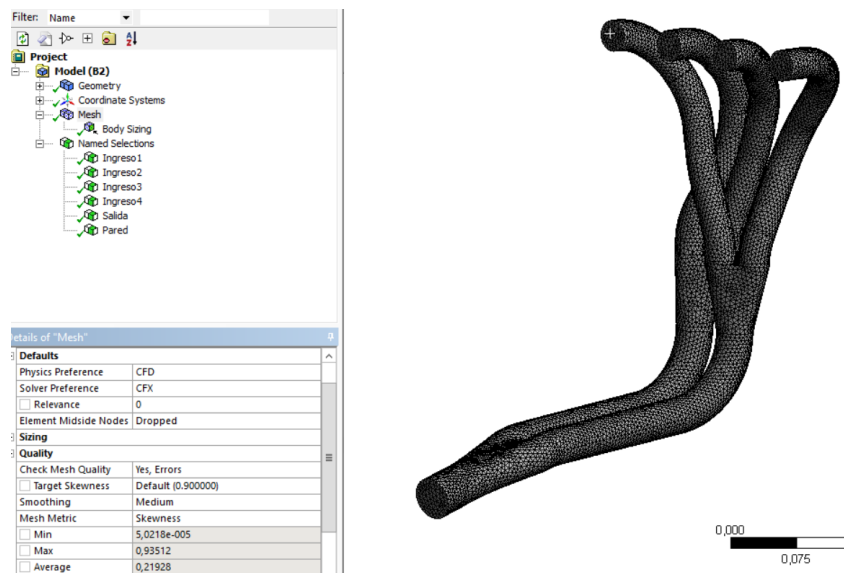


Figura 38. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-2-1

### *Múltiple de escape configuración 4-1.*

El mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1 contiene 90 628 nodos, 459 909 elementos y un factor *Skewness* de 0.21394, presentando una buena calidad de malla, como se indica en la figura 39.

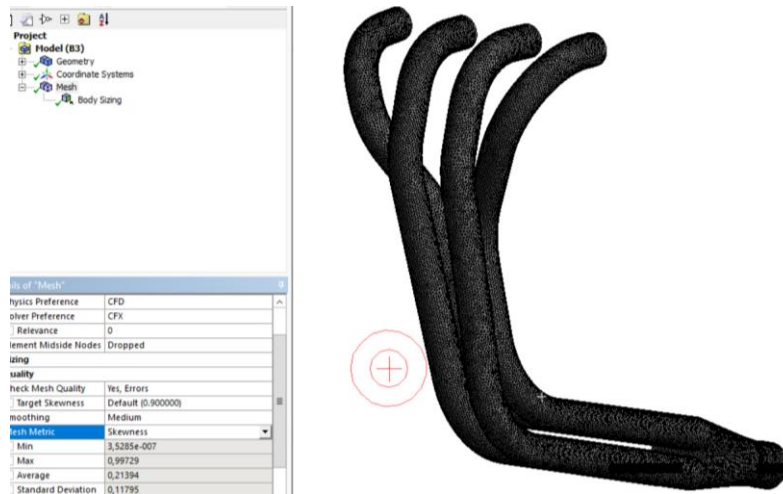


Figura 39. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1

### **CFX-Post.**

El análisis estático permitió realizar una evaluación inicial del flujo en el interior del múltiple de escape, posteriormente, mediante el estudio transitorio se observa el comportamiento de los gases en función del tiempo y conforme al orden de encendido del motor G13B.

### *Análisis estático.*

#### *Múltiple de escape original.*

La figura 40 presenta los resultados de velocidad y de presión obtenidos en el múltiple de escape original de acuerdo al análisis estático. La velocidad promedio en la entrada del múltiple es de 59.6 m/s, alcanzando un valor máximo de 224 m/s en la zona de unión de los colectores secundarios. La presión promedio de las cuatro entradas es de 116.6 KPa, y una presión a la salida de 103 KPa.

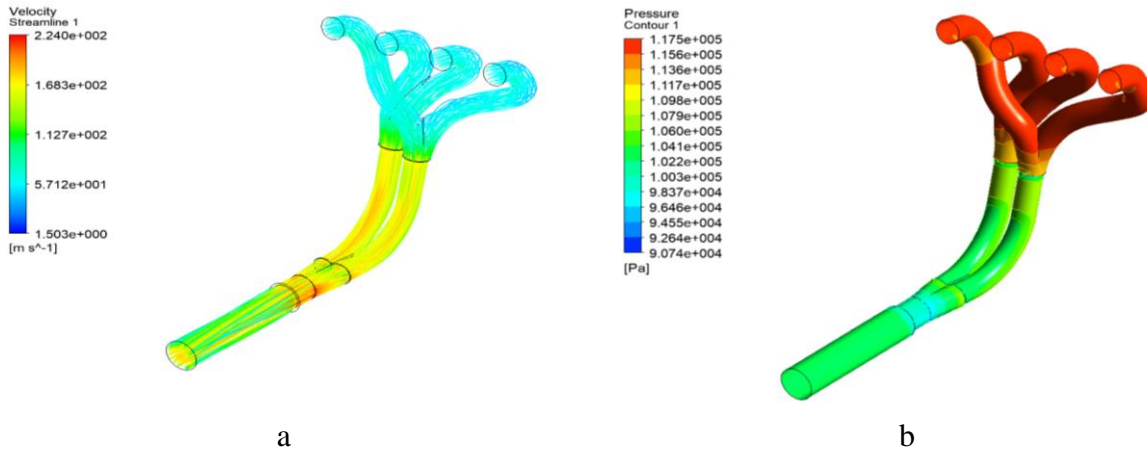


Figura 40. Resultados del análisis estático en múltiple de escape original: (a) velocidad, (b) presión

#### *Múltiple de escape 4-2-1.*

Los resultados del análisis estático para la configuración 4-2-1 se muestra en la figura 41. La velocidad promedio de las cuatro entradas es de 76.59 m/s con una presión de 115.7 KPa. La velocidad máxima es de 187 m/s en la salida, donde la presión es de 103 KPa.

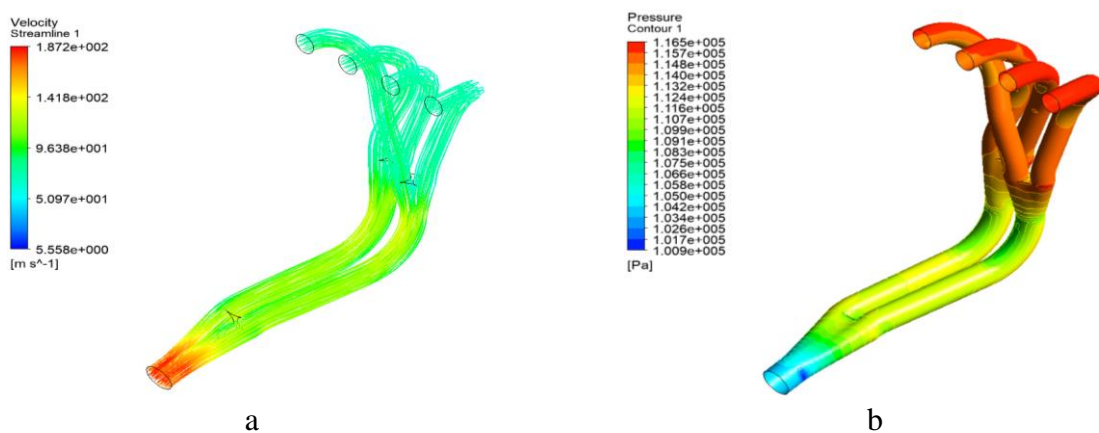


Figura 41. Resultados del análisis estático en múltiple de escape 4-2-1: (a) velocidad, (b) presión

#### *Múltiple de escape 4-1.*

Para la configuración 4-1 se obtuvo los resultados de velocidad y presión mostrados en la figura 42. El promedio de velocidad en el ingreso al múltiple es de 78.91 m/s y alcanza una velocidad máxima de 201 m/s en la salida del colector. En cuanto a la presión de entrada se tiene un promedio de 115.5 KPa, mientras que en la salida es de 103 KPa.



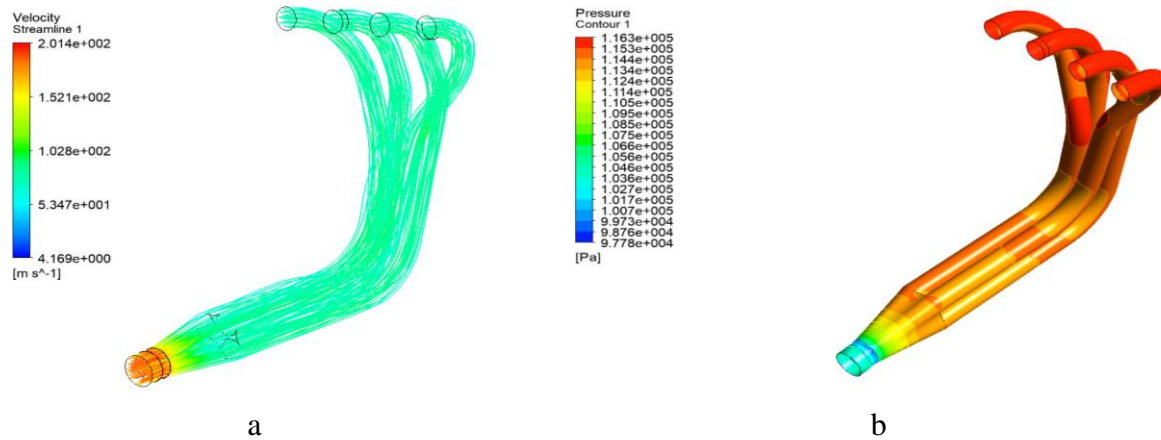


Figura 42. Resultados del análisis estático en múltiple de escape 4-1: (a) velocidad, (b) presión

### *Análisis transitorio.*

En el análisis transitorio se puede observar la variación de velocidad y presión entre los colectores respecto al tiempo, lo que permitió identificar el comportamiento de la configuración del múltiple según el orden de encendido del motor: 1-3-4-2.

En el ingreso se estableció el gasto másico de acuerdo a los resultados de la simulación 1D, para cada caso de estudio.

El tiempo utilizado como duración del análisis transitorio, corresponde a un ciclo de trabajo completo del motor. Para apreciar el comportamiento de los gases en función del tiempo, se seleccionó cuatro valores para visualizar los resultados, como se propone en la tabla 23.

Tabla 23.

*Tiempos para visualización de resultados*

Tipo	Tiempo			
	[s]			
Múltiple original	0.004464	0.009072	0.013680	0.018288
Configuración 4-2-1	0.004464	0.009072	0.013680	0.018288
Configuración 4-1	0.004332	0.008892	0.013452	0.018240

### *Múltiple de escape original.*

En la figura 43 se observa los resultados de velocidad capturados en cuatro instantes de tiempo diferentes. En la parte (a) se encuentra en escape el cilindro 1, en (b) el cilindro 3, en (c)

el cilindro 4 y (d) el cilindro 2, lo que responde al orden de encendido del motor. La velocidad máxima durante el tiempo de análisis alcanza los 422 m/s.

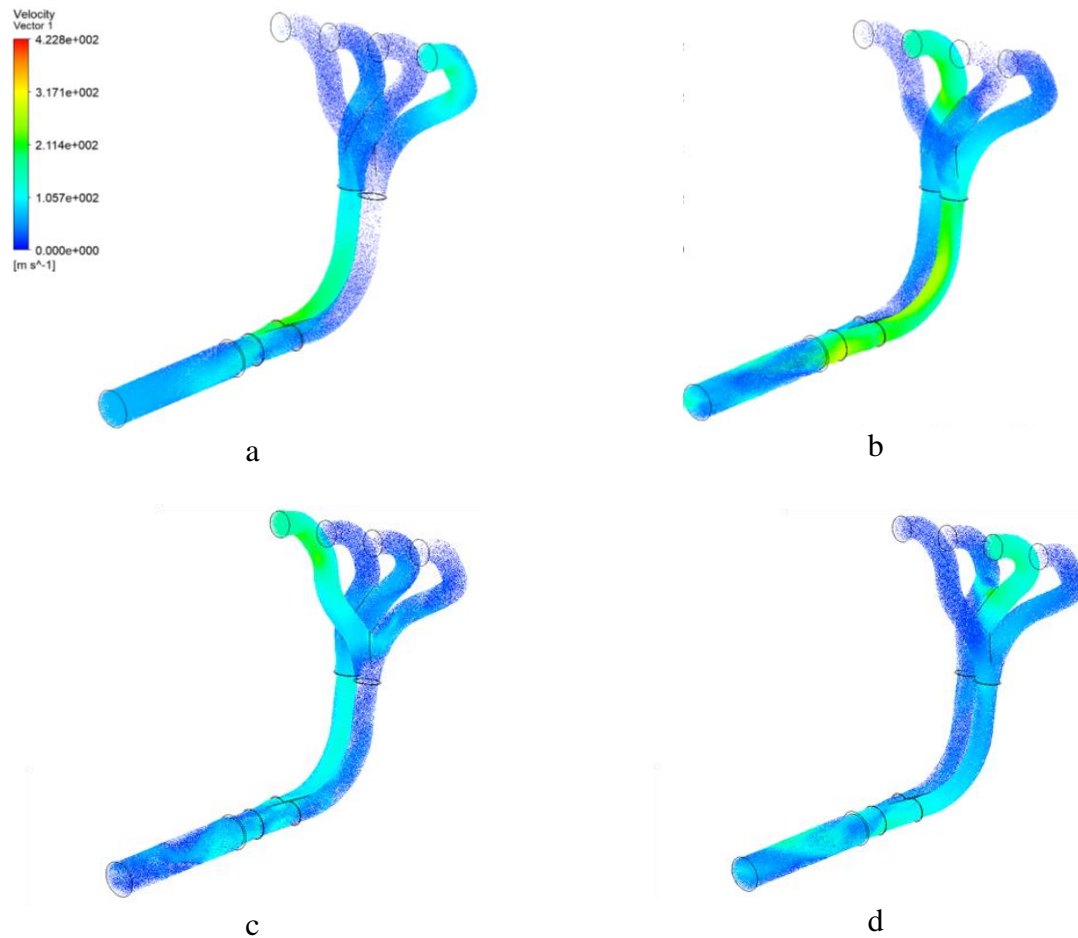


Figura 43. Velocidad en múltiple de escape original, análisis transitorio:  
(a) 0.004464 s, (b) 0.009072 s, (c) 0.013680 s, (d) 0.018288 s.

En la figura 44 se presenta los resultados de presión en cuatro instantes de tiempo, apreciándose de igual forma el orden de encendido 1-3-4-2. La presión máxima es de 249.4 KPa. Se observa que el cilindro 1 influye en los cambios de presión del cilindro 4 y viceversa; al igual que entre el cilindro 2 y 3.

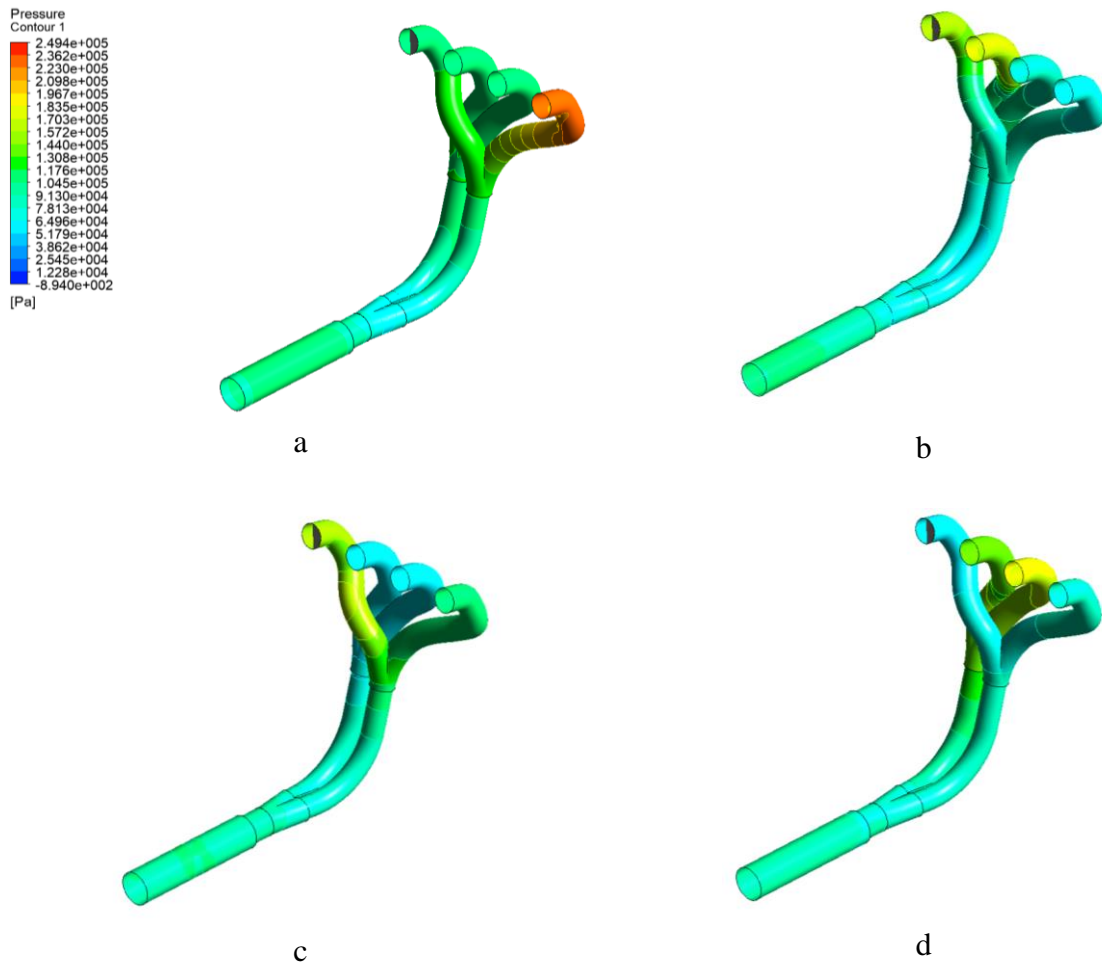


Figura 44. Presión en múltiple de escape original, análisis transitorio:  
(a) 0.004464 s, (b) 0.009072 s, (c) 0.013680 s, (d) 0.018288 s.

### *Múltiple de escape 4-2-1*

Para el múltiple de escape diseñado según la configuración 4-2-1, se presentan cuatro resultados instantáneos de velocidad en la figura 45, según el orden de encendido. La velocidad máxima durante el estudio llega a 303 m/s. Se observa la variación de velocidad en el trayecto del múltiple conforme al avance de los gases por los conductos en el tiempo.

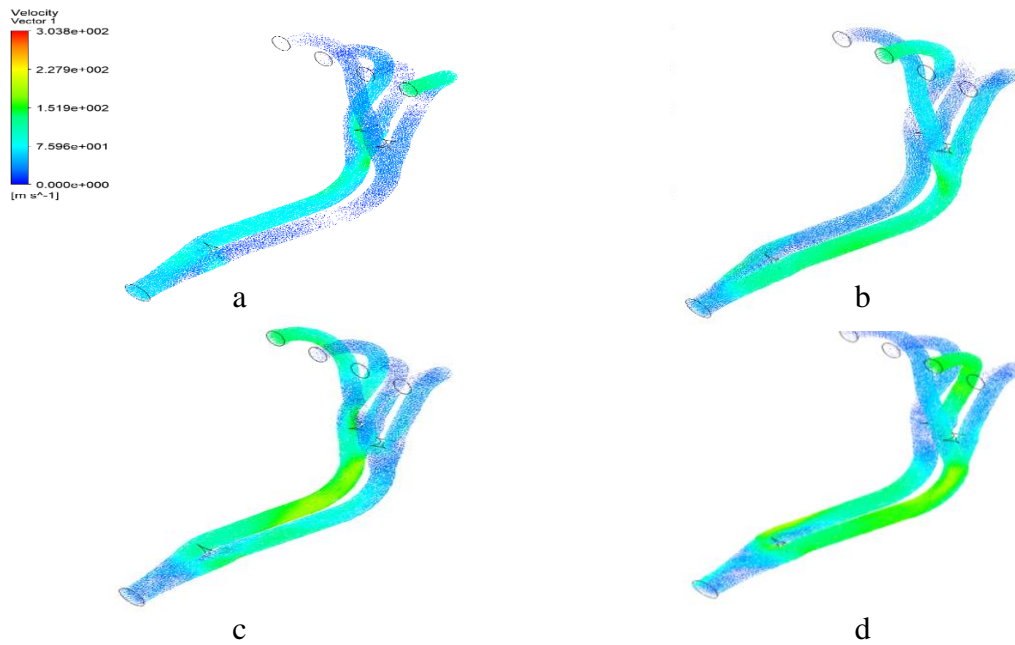


Figura 45. Velocidad en múltiple de escape 4-2-1, análisis transitorio:  
 (a) 0.004464 s, (b) 0.009072 s, (c) 0.013680 s, (d) 0.018288 s.

En la figura 46 se aprecia la variación de presión respecto al tiempo para cuatro instantes seleccionados. Durante el análisis transitorio la presión máxima alcanza los 253.2 KPa.

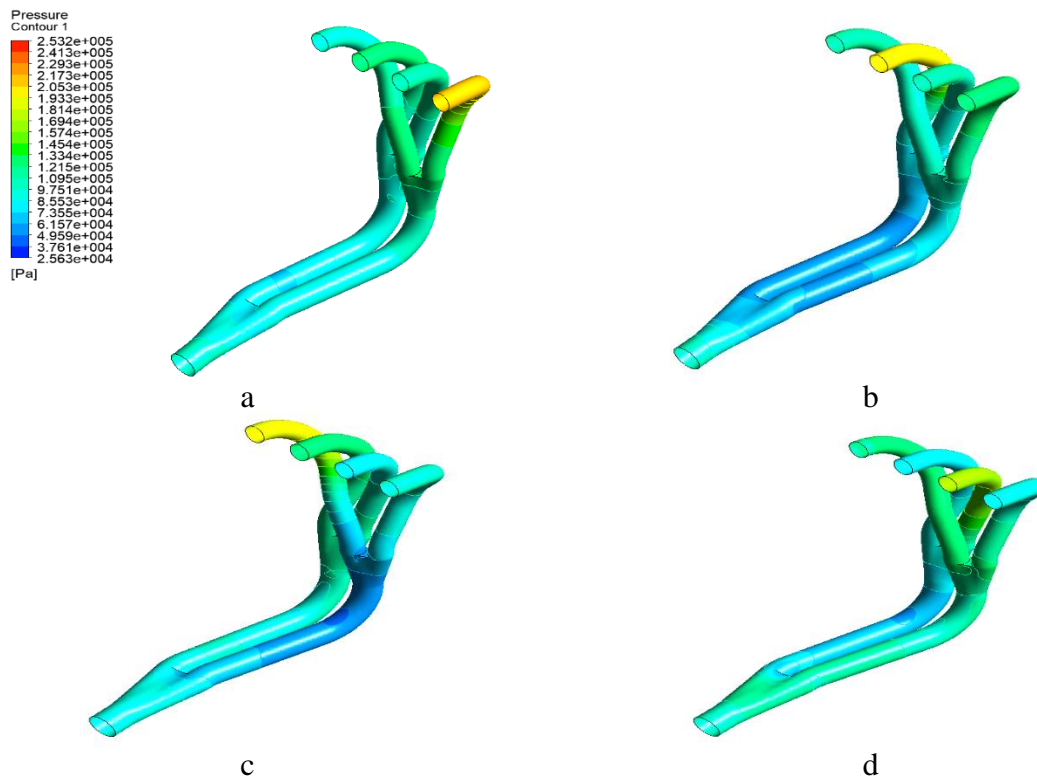


Figura 46. Presión en múltiple de escape 4-2-1, análisis transitorio:  
 (a) 0.004464 s, (b) 0.009072 s, (c) 0.013680 s, (d) 0.018288 s.

*Múltiple de escape 4-1*

En la figura 47 se muestran los resultados de velocidad durante el estudio transitorio, donde se puede apreciar el efecto del orden de encendido del motor. La velocidad máxima bordea los 287 m/s.

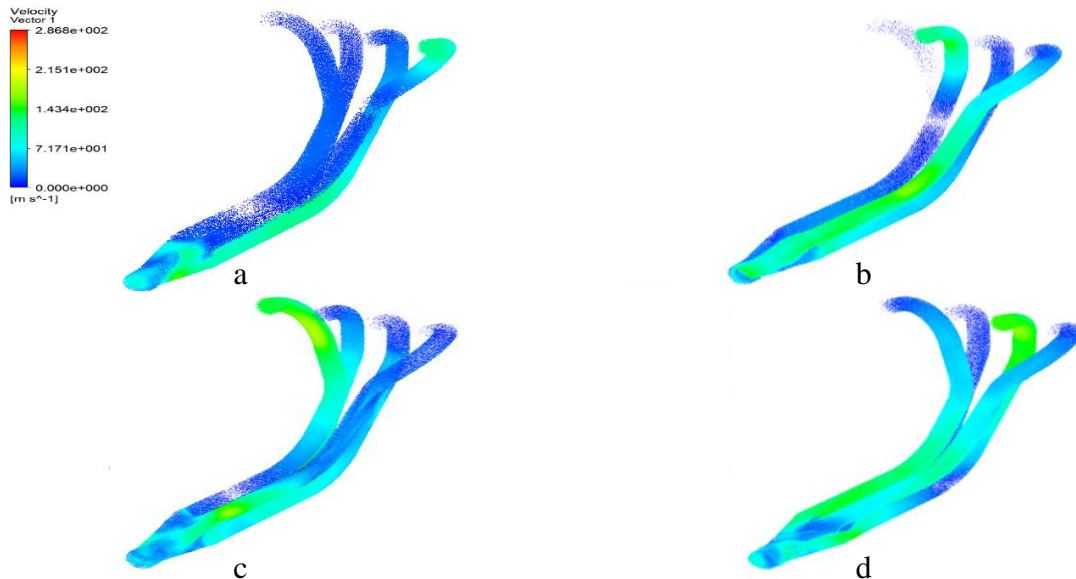


Figura 47. Velocidad en múltiple de escape 4-1, análisis transitorio:  
(a) 0.004332 s, (b) 0.008892 s, (c) 0.013452 s, (d) 0.018240 s.

En los resultados indicados en la figura 48, se observa claramente el cambio de presión respecto al orden de encendido del motor. En esta configuración de múltiple el efecto de presión entre conductos de varios cilindros es mínimo. La presión máxima es de 246.2 KPa.

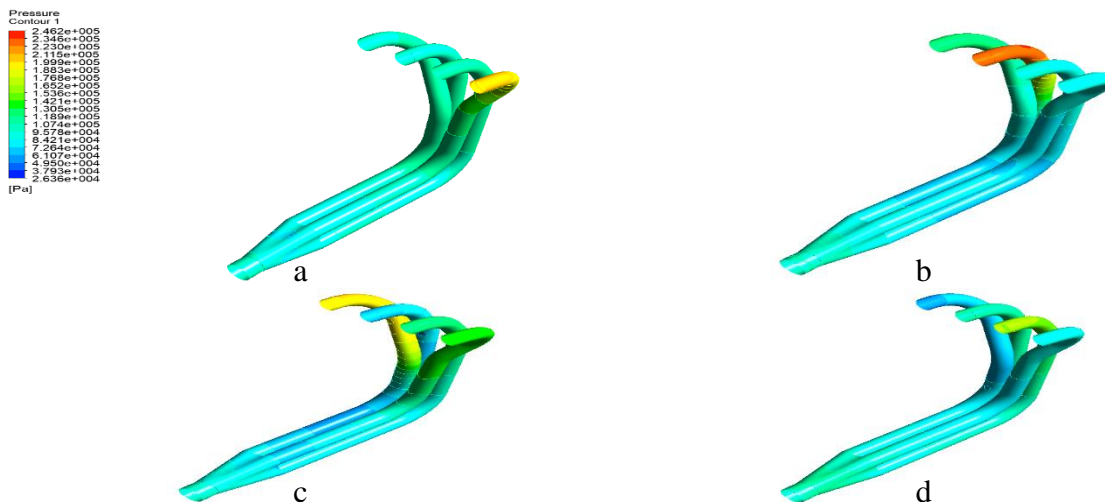


Figura 48. Presión en múltiple de escape 4-1, análisis transitorio:  
(a) 0.004332 s, (b) 0.008892 s, (c) 0.013452 s, (d) 0.018240 s.

### Construcción de Múltiple de Escape

Se seleccionó la configuración de múltiple de escape 4-1 puesto que trabaja mejor en altas revoluciones, y presenta mejores parámetros del fluido en todo el trayecto del múltiple.

La construcción del múltiple de escape se realizó con ayuda de una base para soldadura elaborada conforme al diseño, con la finalidad de fabricar los múltiples según la construcción tipo A y B, manteniendo las características geométricas establecidas.

En la figura 49 en la parte izquierda se observa la base de soldadura en el diseño 3D que permitió obtener las dimensiones exactas para su construcción mostrada en la parte derecha de la figura.



Figura 49. Base para soldadura de múltiples de escape conforme al diseño: (a) modelo CAD, (b) construcción.

En la construcción del múltiple de escape tipo A se utilizó cuatro tubos de longitud establecida de acuerdo al diseño, los cuales fueron doblados, para finalmente unirse en un colector. en la figura 50 se muestra el proceso de construcción sobre la base de soldadura y el resultado final.



Figura 50. Múltiple de escape 4-1, tipo A: (a) proceso de construcción, (b) resultado final.

Para el múltiple de escape de construcción tipo B se ensamblaron las secciones cortadas de tubos rectos y doblados según las longitudes y ángulos establecidos en el diseño.

En la figura 51 se observa el proceso de construcción para un tubo del múltiple correspondiente al cilindro 3; a la izquierda se encuentran las longitudes de corte para tubos rectos y los ángulos de sección respecto al centro de la curvatura; una vez cortados los tubos se unieron como se observa en la parte derecha de la figura.

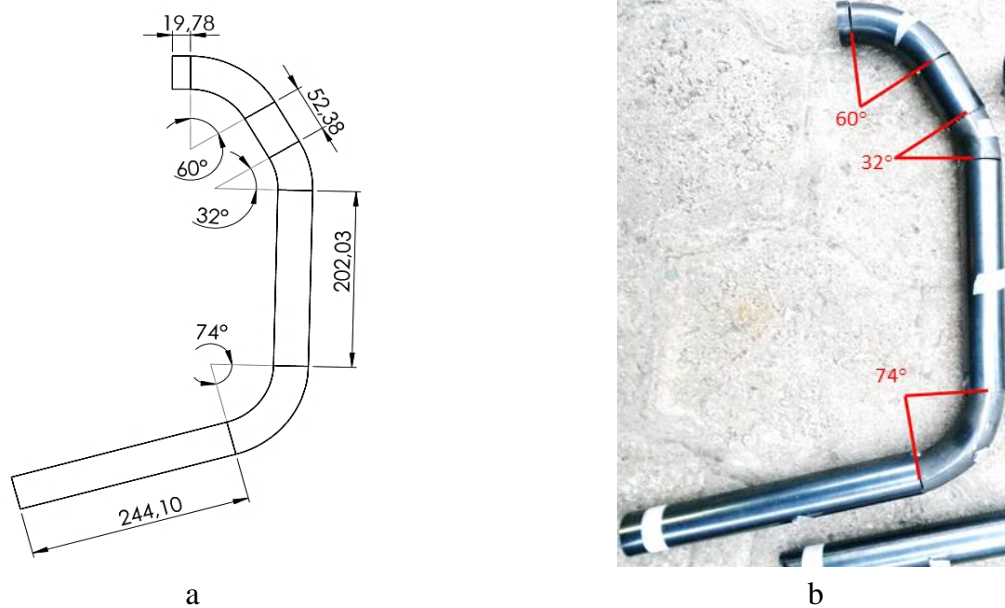


Figura 51. Proceso de ensamblaje de tubería: (a) dimensiones de diseño, (b) construcción

El proceso mencionado, se llevó a cabo para cada tubo del múltiple. En el anexo 7 se puede acceder a los planos, en los cuales se indica las dimensiones a detalle para cada miembro del múltiple.

En la figura 52 se presenta el proceso de construcción, mediante el ensamble de cada elemento sobre la base de soldadura y el múltiple terminado de construcción tipo B.

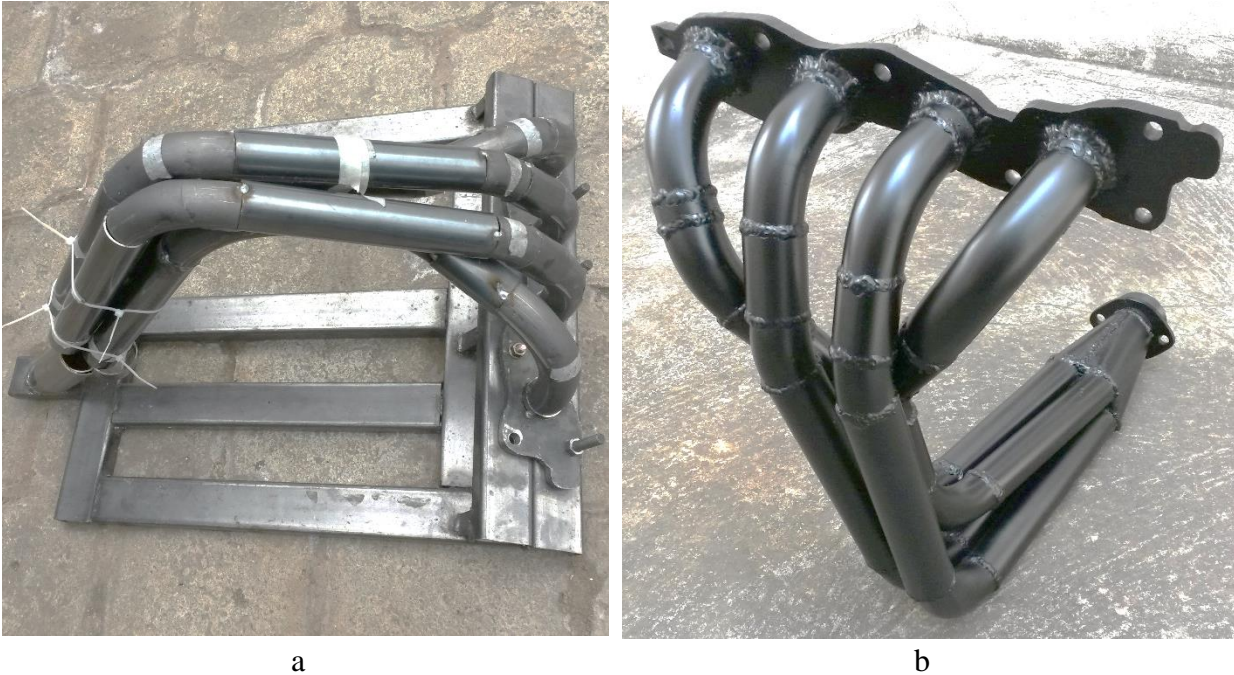


Figura 52. Múltiple de escape 4-1, construcción tipo B: (a) proceso de construcción, (b) resultado final.

### Pruebas Dinamométricas

Luego de realizar cuatro pruebas consecutivas en el dinamómetro de rodillos con cada múltiple de escape, se obtuvo los resultados de potencia y torque.

#### **Obtención de potencia con múltiple de escape original.**

En la tabla 24 se muestran los resultados de potencia obtenidos de la medición en el vehículo, luego de cuatro pruebas consecutivas en el dinamómetro.



Tabla 24.

*Resultados de potencia con el múltiple de escape original*

<b>n</b> <b>[rpm]</b>	<b>P1</b> <b>[kW]</b>	<b>P2</b> <b>[kW]</b>	<b>P3</b> <b>[kW]</b>	<b>P4</b> <b>[kW]</b>	<b>N<sub>EPROM</sub></b> <b>[kW]</b>
2800	26.56	27.27	21.62	28.24	25.92
2900	27.83	28.40	23.03	29.22	27.12
3000	28.82	29.53	24.44	30.21	28.25
3100	29.80	30.52	25.85	31.48	29.42
3200	30.79	31.51	26.98	32.47	30.44
3300	31.64	32.50	28.11	33.60	31.46
3400	32.63	33.49	28.96	34.73	32.45
3500	33.76	34.34	29.81	35.86	33.44
3600	33.90	35.18	30.66	36.71	34.11
3700	35.45	35.89	31.50	37.70	35.14
3800	36.30	36.74	32.35	38.40	35.95
3900	37.01	37.59	33.34	39.25	36.80
4000	37.71	38.43	34.19	40.10	37.61
4100	38.42	39.00	34.75	40.80	38.24
4200	39.13	39.71	35.46	41.65	38.99
4300	39.83	40.41	36.03	42.78	39.76
4400	40.68	41.54	36.59	43.77	40.65
4500	41.81	42.67	37.30	44.75	41.63
4600	42.80	43.80	38.00	45.74	42.59
4700	43.79	44.93	38.57	46.87	43.54
4800	45.06	46.06	39.28	48.57	44.74
4900	46.05	47.34	39.98	49.84	45.80
5000	47.32	48.89	40.83	51.67	47.18
5100	48.87	50.59	41.82	53.23	48.63
5200	50.57	52.14	42.95	54.50	50.04
5300	51.98	53.27	43.94	55.63	51.20
5400	53.25	54.26	44.78	56.76	52.26
5500	54.24	55.25	45.63	57.74	53.22
5600	54.95	56.10	46.62	58.59	54.06
5700	55.65	56.38	47.75	59.01	54.70
5800	56.22	56.80	49.31	59.16	55.37
5900	56.50	57.23	50.72	59.58	56.01
6000	57.07	57.65	51.99	60.43	56.78
6100	57.49	57.93	52.98	60.85	57.31
6200	58.34	58.22	53.40	61.13	57.77
6300	59.04	58.64	54.39	61.56	58.41
6400	59.75	58.92	55.38	61.56	58.90
6500	-	59.06	56.37	61.84	59.09
6600	-	58.92	57.08	62.26	59.42
6700	-	58.50	57.22	61.98	59.23
6800	-	57.65	57.64	61.13	58.81
6900	-	56.94	58.21	60.85	58.67
7000	-	56.52	58.91	60.85	58.76
Potencia máxima	59.75	59.06	58.91	62.26	59.42

Nota: Corrección de potencia según Normas ISO 1585, JIS D 1001, SAE J 1349

En la figura 53 se presenta las curvas de potencia, correspondientes a las cuatro pruebas realizadas en el dinamómetro.

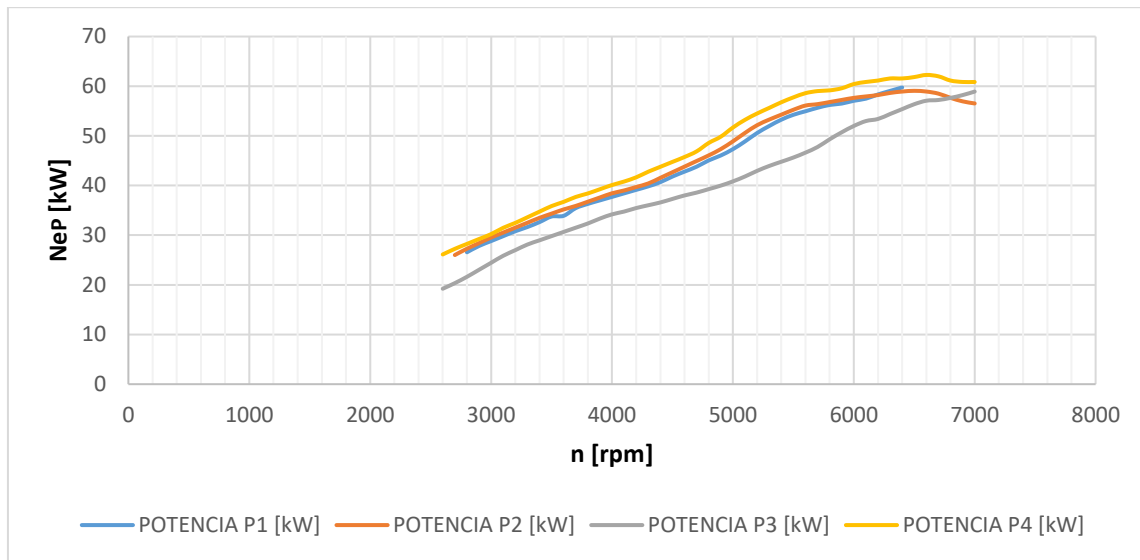


Figura 53. Curvas de potencia con múltiple de escape original

#### Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo A.

Las curvas de potencia obtenidas luego de cuatro mediciones con el múltiple de escape 4-1 de construcción tipo A se presentan en la figura 54 correspondientes a los valores de la tabla 25.

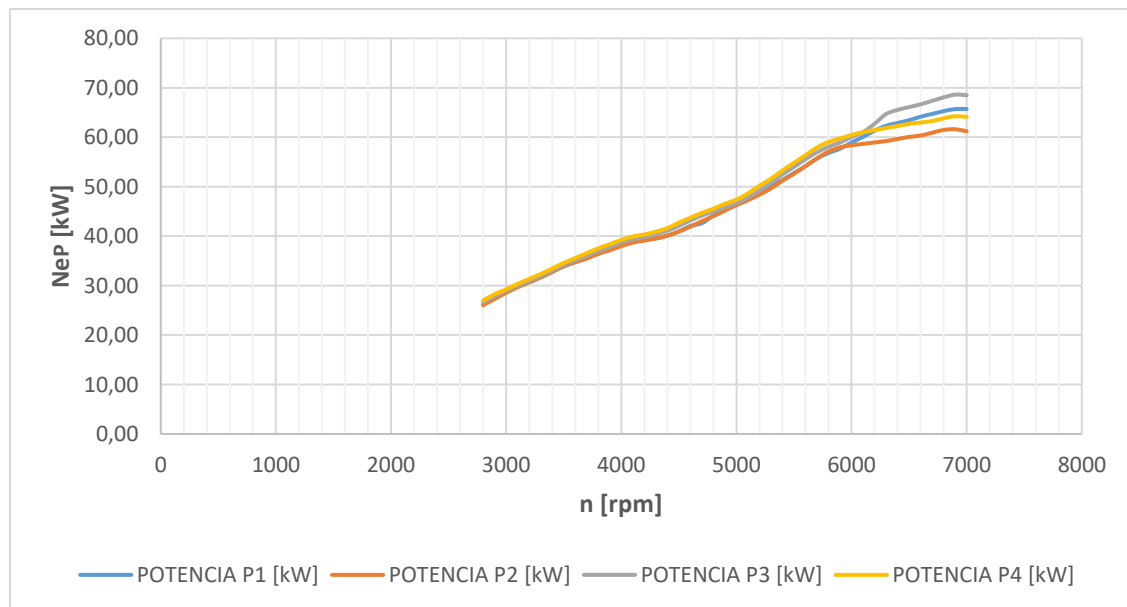


Figura 54. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, tipo A

Tabla 25.

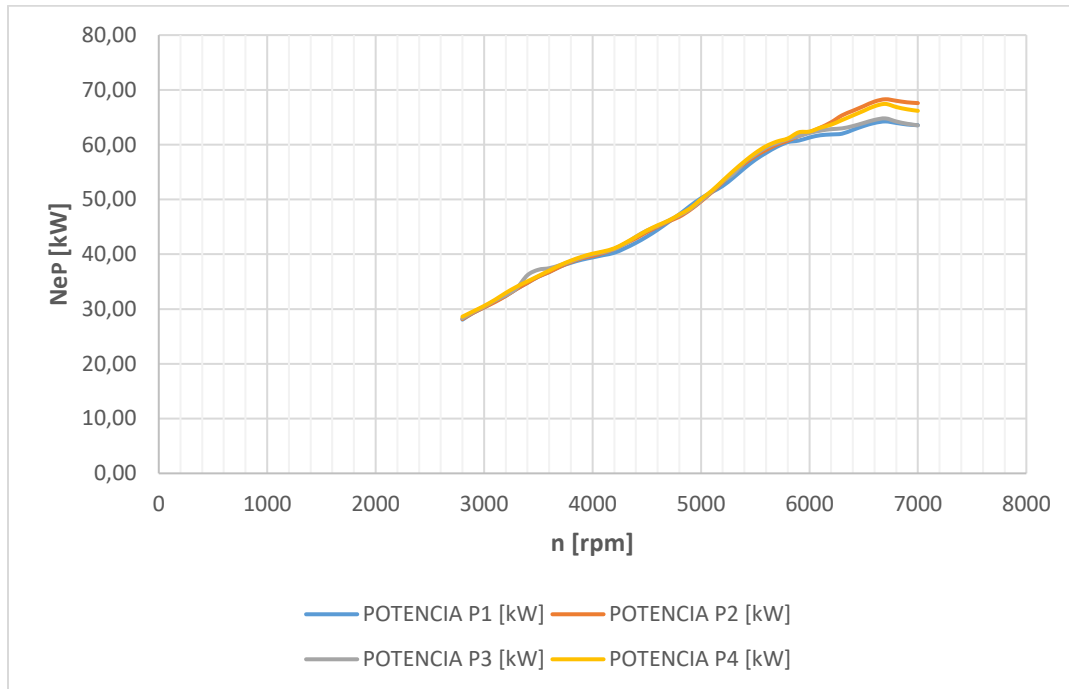
*Resultados de potencia con el múltiple de escape 4-1, tipo A*

<b>n</b> <b>[rpm]</b>	<b>P1</b> <b>[kW]</b>	<b>P2</b> <b>[kW]</b>	<b>P3</b> <b>[kW]</b>	<b>P4</b> <b>[kW]</b>	<b>N<sub>EPROM</sub></b> <b>[kW]</b>
2800	26.16	26.02	26.58	26.99	26.44
2900	27.57	27.29	27.84	28.25	27.74
3000	28.69	28.55	28.97	29.24	28.86
3100	29.82	29.68	29.95	30.36	29.95
3200	30.66	30.66	30.93	31.35	30.90
3300	31.65	31.65	31.92	32.33	31.89
3400	32.77	32.77	33.04	33.45	33.01
3500	33.90	33.90	34.17	34.58	34.14
3600	34.74	34.74	35.15	35.56	35.05
3700	35.59	35.45	36.00	36.55	35.89
3800	36.43	36.43	36.98	37.53	36.84
3900	37.42	37.13	37.82	38.37	37.69
4000	38.26	37.98	38.67	39.22	38.53
4100	38.96	38.68	39.37	39.92	39.23
4200	39.24	39.10	39.79	40.34	39.62
4300	39.53	39.53	40.36	40.90	40.08
4400	40.09	40.09	41.06	41.61	40.71
4500	40.93	40.93	42.04	42.73	41.66
4600	42.06	41.92	43.17	43.72	42.71
4700	42.62	43.04	44.15	44.70	43.63
4800	44.17	44.03	45.00	45.54	44.68
4900	45.29	45.15	45.84	46.53	45.70
5000	46.42	46.28	46.68	47.37	46.69
5100	47.40	47.26	47.81	48.64	47.78
5200	48.67	48.39	49.21	50.18	49.11
5300	50.08	49.65	50.76	51.59	50.52
5400	51.34	51.20	52.45	53.27	52.07
5500	52.75	52.61	54.00	54.82	53.54
5600	54.15	54.15	55.54	56.37	55.05
5700	55.70	55.70	56.95	57.91	56.57
5800	56.83	57.11	58.07	59.04	57.76
5900	57.67	57.95	58.92	59.74	58.57
6000	58.94	58.37	60.04	60.44	59.45
6100	60.06	58.66	61.03	61.00	60.19
6200	61.33	58.94	62.71	61.43	61.10
6300	62.31	59.22	64.68	61.85	62.02
6400	62.88	59.64	65.53	62.27	62.58
6500	63.44	60.06	66.09	62.69	63.07
6600	64.14	60.34	66.65	62.97	63.53
6700	64.70	60.91	67.35	63.25	64.05
6800	65.27	61.47	68.06	63.82	64.65
6900	65.69	61.61	68.62	64.24	65.04
7000	65.69	61.19	68.48	64.10	64.86
Potencia máxima	65.69	61.61	68.62	64.24	65.04

Nota: Corrección de potencia según Normas ISO 1585, JIS D 1001, SAE J 1349

**Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo B.**

En la figura 55 se muestran los resultados de potencia al utilizar el múltiple de escape 4-1 de construcción tipo B.



*Figura 55.* Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, tipo B

Los resultados en cada régimen de giro del motor para las cuatro pruebas consecutivas, llevadas a cabo con el múltiple de escape configuración 4-1 y construcción tipo B, se presentan en la tabla 26.

Tabla 26.

*Resultados de potencia con el múltiple de escape 4-1, tipo B*

<b>n [rpm]</b>	<b>P1 [kW]</b>	<b>P2 [kW]</b>	<b>P3 [kW]</b>	<b>P4 [kW]</b>	<b>N<sub>EPROM</sub> [kW]</b>
2800	28.06	28.19	28.33	28.60	28.29
2900	29.32	29.31	29.45	29.58	29.42
3000	30.30	30.29	30.43	30.56	30.40
3100	31.42	31.27	31.56	31.69	31.48
3200	32.40	32.39	32.54	32.95	32.57
3300	33.67	33.65	33.80	34.07	33.80
3400	34.79	34.78	36.19	35.05	35.20
3500	35.91	35.90	37.17	36.03	36.25
3600	36.75	36.74	37.45	37.01	36.99
3700	37.73	37.72	38.01	38.00	37.86
3800	38.44	38.56	38.71	38.84	38.64
3900	39.00	39.26	39.41	39.54	39.30
4000	39.42	39.68	39.97	40.10	39.79
4100	39.84	40.25	40.39	40.52	40.25
4200	40.26	40.95	40.95	41.08	40.81
4300	41.10	41.93	41.94	42.06	41.76
4400	42.08	42.91	43.20	43.18	42.84
4500	43.21	44.03	44.32	44.30	43.97
4600	44.47	45.01	45.16	45.29	44.98
4700	45.87	46.00	46.14	46.13	46.03
4800	47.27	46.84	47.12	47.25	47.12
4900	48.82	48.10	48.25	48.37	48.38
5000	50.22	49.64	49.79	50.05	49.93
5100	51.34	51.32	51.47	51.60	51.43
5200	52.46	53.15	53.30	53.42	53.08
5300	54.01	54.97	54.70	55.24	54.73
5400	55.69	56.51	56.80	56.92	56.48
5500	57.23	57.91	58.20	58.47	57.95
5600	58.50	59.04	59.47	59.73	59.18
5700	59.62	60.02	60.31	60.57	60.13
5800	60.46	60.72	61.01	61.13	60.83
5900	60.74	61.56	61.57	62.25	61.53
6000	61.30	62.26	62.13	62.39	62.02
6100	61.72	63.10	62.55	63.09	62.62
6200	61.86	64.08	62.83	63.65	63.11
6300	62.00	65.35	62.97	64.49	63.70
6400	62.70	66.19	63.39	65.34	64.41
6500	63.41	67.03	63.96	66.18	65.14
6600	63.97	67.87	64.52	67.02	65.84
6700	64.25	68.29	64.80	67.44	66.19
6800	63.97	68.01	64.24	66.88	65.77
6900	63.69	67.73	63.82	66.46	65.42
7000	63.55	67.59	63.53	66.18	65.21
Potencia máxima	64.25	68.29	64.80	67.44	66.19

Nota: Corrección de potencia según Normas ISO 1585, JIS D 1001, SAE J 1349

Los valores y curvas obtenidas luego de cuatro ensayos consecutivos para cada múltiple de escape, no muestran mayor diferencia entre los resultados de las pruebas de un mismo caso; sin embargo, en altas revoluciones se aprecia una mayor diferencia de valores, lo cual hace necesario utilizar los resultados promedio para el posterior análisis.

### Obtención de torque con múltiple de escape original.

De las cuatro pruebas realizadas en el dinamómetro al vehículo con múltiple de escape original, se obtuvo las curvas de torque de la figura 56.

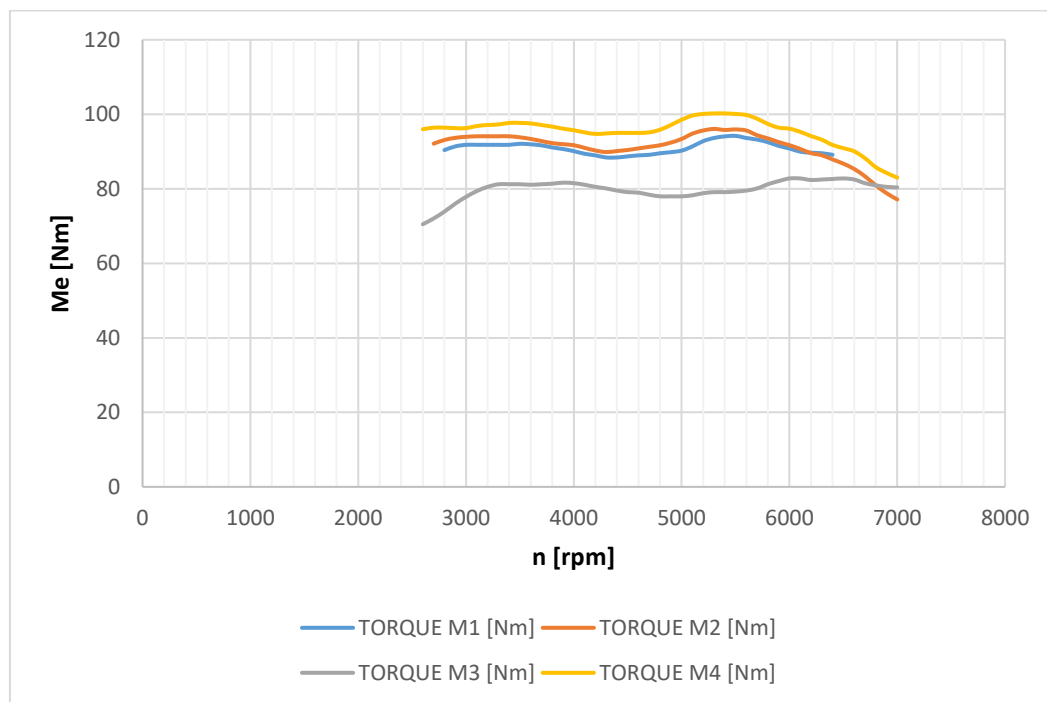


Figura 56. Curvas de torque con múltiple de escape original

En la tabla 27 se detallan los resultados de torque para cada ensayo de acuerdo al régimen de giro del motor, junto al promedio obtenido de las cuatro pruebas dinamométricas.

Tabla 27.

*Resultados de torque con el múltiple de escape original*

<b>n</b> <b>[rpm]</b>	<b>M1</b> <b>[Nm]</b>	<b>M2</b> <b>[Nm]</b>	<b>M3</b> <b>[Nm]</b>	<b>M4</b> <b>[Nm]</b>	<b>Me<sub>PROM</sub></b> <b>[Nm]</b>
2800	90.40	93.12	73.89	96.43	88.46
2900	91.39	93.68	76.01	96.29	89.34
3000	91.81	93.96	77.84	96.29	89.98
3100	91.81	94.11	79.40	96.85	90.54
3200	91.81	94.11	80.53	97.13	90.90
3300	91.81	94.11	81.23	97.27	91.11
3400	91.81	94.11	81.23	97.70	91.21
3500	92.10	93.82	81.23	97.70	91.21
3600	91.95	93.40	81.09	97.56	91.00
3700	91.67	92.83	81.23	97.13	90.72
3800	91.11	92.27	81.38	96.71	90.37
3900	90.68	91.99	81.66	96.15	90.12
4000	90.12	91.70	81.52	95.72	89.77
4100	89.41	91.00	81.09	95.16	89.16
4200	88.99	90.29	80.53	94.73	88.64
4300	88.42	89.87	80.10	94.87	88.32
4400	88.42	90.15	79.54	95.02	88.28
4500	88.71	90.43	79.12	95.02	88.32
4600	88.99	90.86	78.97	95.02	88.46
4700	89.13	91.28	78.41	95.16	88.49
4800	89.55	91.70	77.99	95.86	88.78
4900	89.84	92.41	77.99	97.13	89.34
5000	90.26	93.40	77.99	98.55	90.05
5100	91.39	94.81	78.27	99.67	91.04
5200	92.80	95.66	78.83	100.10	91.85
5300	93.65	96.08	79.12	100.24	92.27
5400	94.07	95.80	79.12	100.24	92.31
5500	94.21	95.94	79.26	100.10	92.38
5600	93.65	95.66	79.54	99.82	92.17
5700	93.23	94.39	80.10	98.83	91.64
5800	92.52	93.54	81.23	97.42	91.18
5900	91.53	92.55	82.08	96.43	90.65
6000	90.82	91.70	82.79	96.15	90.37
6100	89.98	90.71	82.79	95.30	89.69
6200	89.69	89.58	82.36	94.17	88.95
6300	89.55	89.02	82.51	93.18	88.56
6400	89.13	87.89	82.65	91.77	87.86
6500		86.76	82.79	90.92	86.82
6600		85.35	82.51	90.07	85.98
6700		83.37	81.52	88.24	84.37
6800		80.97	80.95	85.84	82.59
6900		78.85	80.53	84.29	81.22
7000		77.15	80.39	83.02	80.18
<b>Torque máximo</b>	<b>94.21</b>	<b>96.08</b>	<b>82.79</b>	<b>100.24</b>	<b>92.38</b>

Nota: Factor de corrección según Normas ISO 1585, JIS D 1001, SAE J 1349

**Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo A.**

En la figura 57, se presentan los resultados de torque luego de cuatro pruebas consecutivas en el vehículo Suzuki al usar el múltiple de escape configuración 4-1 y de construcción tipo A, tubos doblados. Las curvas generadas no muestran mayor diferencia entre sí.

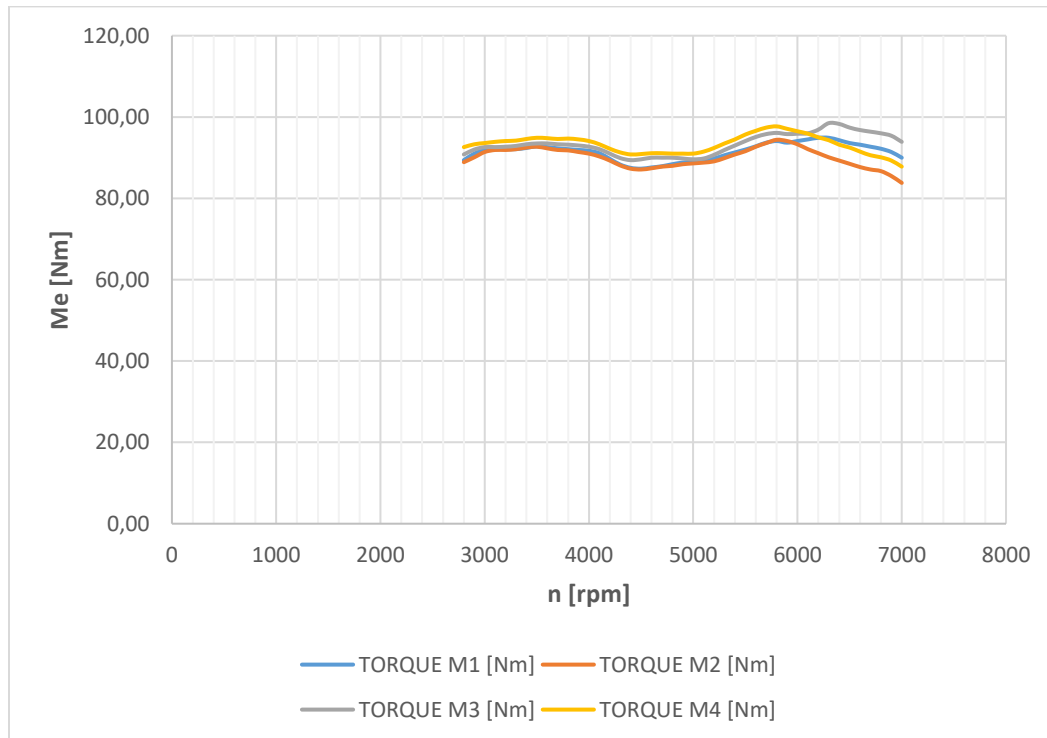


Figura 57. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, tipo A

En la tabla 28, se encuentran los resultados de torque para cada prueba con el múltiple de escape 4-1, construcción tipo A. También se detalla el resultado promedio de los cuatro ensayos realizados.



Tabla 28.

*Resultados de torque con el múltiple de escape 4-1, tipo A*

<b>n</b> <b>[rpm]</b>	<b>M1</b> <b>[Nm]</b>	<b>M2</b> <b>[Nm]</b>	<b>M3</b> <b>[Nm]</b>	<b>M4</b> <b>[Nm]</b>	<b>MePROM</b> <b>[Nm]</b>
2800	89.40	88.90	90.80	92.60	90.43
2900	91.00	90.10	92.00	93.30	91.60
3000	91.90	91.40	92.60	93.60	92.38
3100	92.10	91.90	92.60	93.90	92.63
3200	92.10	91.90	92.70	94.10	92.70
3300	92.10	92.10	92.90	94.20	92.83
3400	92.40	92.50	93.30	94.60	93.20
3500	92.80	92.70	93.50	94.90	93.48
3600	92.60	92.30	93.50	94.80	93.30
3700	92.30	91.90	93.30	94.60	93.03
3800	92.10	91.80	93.20	94.70	92.95
3900	91.90	91.40	93.00	94.50	92.70
4000	91.70	91.00	92.70	94.10	92.38
4100	91.10	90.30	92.10	93.30	91.70
4200	89.70	89.30	91.00	92.20	90.55
4300	88.30	88.10	89.90	91.30	89.40
4400	87.50	87.30	89.40	90.80	88.75
4500	87.30	87.10	89.60	90.90	88.73
4600	87.60	87.40	90.00	91.10	89.03
4700	87.90	87.80	90.00	91.10	89.20
4800	88.40	88.00	90.00	91.00	89.35
4900	88.80	88.40	89.80	91.00	89.50
5000	89.00	88.60	89.60	91.00	89.55
5100	89.20	88.80	89.80	91.50	89.83
5200	89.80	89.10	90.70	92.40	90.50
5300	90.60	89.90	91.90	93.50	91.48
5400	91.30	90.80	93.00	94.50	92.40
5500	92.00	91.60	94.10	95.70	93.35
5600	92.80	92.70	95.10	96.60	94.30
5700	93.70	93.60	95.80	97.40	95.13
5800	94.10	94.40	96.10	97.70	95.58
5900	93.70	94.10	95.80	97.10	95.18
6000	94.10	93.30	95.90	96.50	94.95
6100	94.50	92.10	96.00	95.90	94.63
6200	94.90	91.10	96.90	95.00	94.48
6300	94.90	90.10	98.50	94.30	94.45
6400	94.30	89.30	98.30	93.20	93.78
6500	93.60	88.50	97.40	92.50	93.00
6600	93.20	87.70	96.80	91.50	92.30
6700	92.70	87.10	96.40	90.60	91.70
6800	92.20	86.70	96.00	90.10	91.25
6900	91.40	85.50	95.40	89.30	90.40
7000	90.00	83.80	93.90	87.80	88.88
Torque máximo	94.90	94.40	98.50	97.70	95.58

Nota: Factor de corrección según Normas ISO 1585, JIS D 1001, SAE J 1349

**Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo B.**

Los resultados de torque luego de cuatro pruebas consecutivas al usar el múltiple de escape configuración 4-1 y construcción tipo B o *step header*, se muestran figura 58, observando una mínima diferencia entre las curvas generadas.

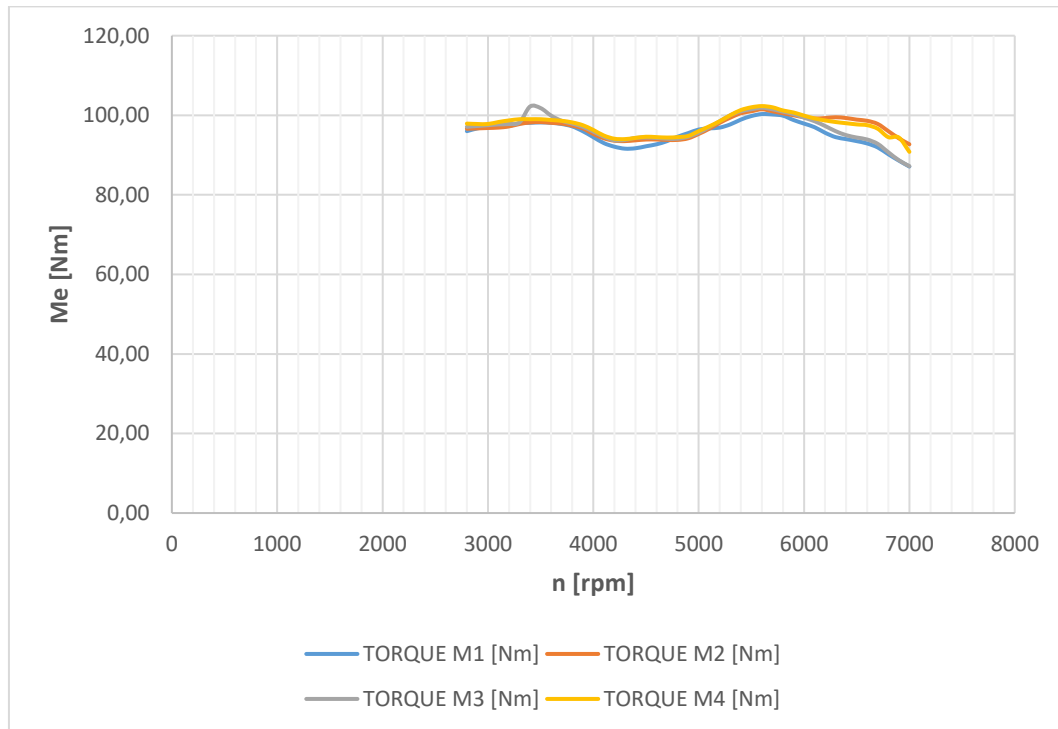


Figura 58. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, tipo B

Los resultados de torque luego de cuatro pruebas consecutivas, correspondientes a cada régimen de giro de motor para el múltiple 4-1, tipo B, se detallan en la tabla 29, junto con el promedio de los cuatro ensayos.

Tabla 29.

*Resultados de torque con el múltiple de escape 4-1, tipo B*

<b>n</b> <b>[rpm]</b>	<b>M1</b> <b>[Nm]</b>	<b>M2</b> <b>[Nm]</b>	<b>M3</b> <b>[Nm]</b>	<b>M4</b> <b>[Nm]</b>	<b>Me<sub>PROM</sub></b> <b>[Nm]</b>
2800	96.00	96.60	97.10	97.90	96.90
2900	96.70	96.70	97.30	97.80	97.13
3000	97.10	96.80	97.50	97.80	97.30
3100	97.10	96.90	97.70	98.30	97.50
3200	97.30	97.20	97.80	98.70	97.75
3300	98.00	97.80	98.20	99.00	98.25
3400	98.10	98.20	102.20	99.00	99.38
3500	98.20	98.30	101.80	99.00	99.33
3600	98.10	98.10	99.90	98.80	98.73
3700	97.80	97.90	98.60	98.60	98.23
3800	97.20	97.40	97.90	98.20	97.68
3900	96.00	96.70	97.10	97.50	96.83
4000	94.50	95.30	95.90	96.30	95.50
4100	93.00	94.20	94.60	94.90	94.18
4200	92.10	93.60	93.70	94.10	93.38
4300	91.60	93.50	93.80	94.00	93.23
4400	91.70	93.70	94.30	94.30	93.50
4500	92.20	93.90	94.40	94.60	93.78
4600	92.70	93.90	94.30	94.50	93.85
4700	93.50	93.80	94.10	94.40	93.95
4800	94.60	93.80	94.10	94.50	94.25
4900	95.50	94.20	94.60	94.80	94.78
5000	96.40	95.30	95.60	96.00	95.83
5100	96.70	96.60	97.00	97.20	96.88
5200	96.90	98.10	98.50	98.50	98.00
5300	97.70	99.40	100.00	100.00	99.28
5400	98.90	100.50	101.00	101.30	100.43
5500	99.80	101.00	101.50	102.00	101.08
5600	100.30	101.50	101.90	102.30	101.50
5700	100.20	101.00	101.50	102.00	101.18
5800	99.90	100.50	100.90	101.20	100.63
5900	98.80	100.00	100.30	100.70	99.95
6000	97.90	99.50	99.40	99.90	99.18
6100	97.00	99.20	98.50	99.20	98.48
6200	95.60	99.30	97.30	98.70	97.73
6300	94.50	99.50	96.00	98.30	97.08
6400	94.00	99.30	95.00	98.00	96.58
6500	93.50	98.90	94.40	97.70	96.13
6600	92.90	98.60	93.90	97.50	95.73
6700	91.90	97.80	92.80	96.60	94.78
6800	90.20	96.00	90.70	94.50	92.85
6900	88.60	94.20	88.70	94.40	91.48
7000	87.10	92.70	87.20	90.80	89.45
<b>Torque máximo</b>	<b>100.30</b>	<b>101.50</b>	<b>102.20</b>	<b>102.30</b>	<b>101.50</b>

Nota: Factor de corrección según Normas ISO 1585, JIS D 1001, SAE J 1349

## Análisis y Discusión de Resultados

### Análisis de los Cálculos Introdutorios

Las longitudes calculadas mediante las relaciones de Gillieri y Heisler poseen un amplio rango de diferencia entre ellas y las dimensiones del múltiple original, por lo cual fue necesario analizar con longitudes de colector entre 500 a 800 mm en el programa OpenWAM para encontrar la que aporte al mejor desempeño del motor.

### Simulación 1D

Los resultados obtenidos de la simulación 1D permitieron desarrollar un análisis estadístico para observar los parámetros más influyentes en el desempeño del motor.

#### Configuración 4-2-1.

La figura 59 presenta la variación de potencia a 6 500 rpm relacionando varias dimensiones de colector primario y secundario. En las combinaciones de primario-secundario (mm): 250-350, 350-350, 400-350, 250-400, 300-400, 350-400, se alcanza mejores resultados de potencia.

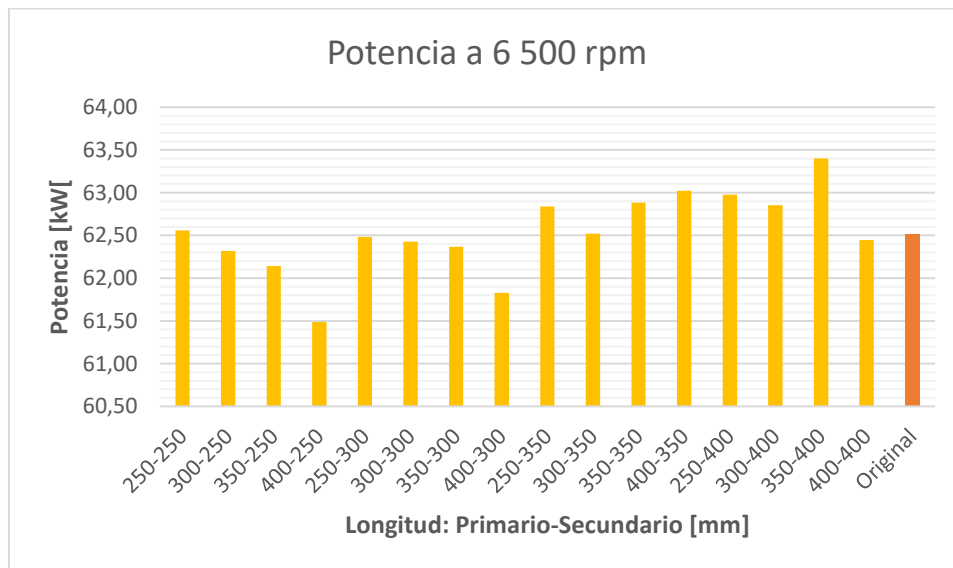


Figura 59. Comparación de potencia para varias dimensiones en la configuración 4-2-1

Se observa que la longitud del colector secundario es más influyente para alcanzar valores de potencia más altos; es decir, a mayor longitud de colector secundario, mayor rendimiento del motor.

#### Configuración 4-1.

De los resultados de potencia al variar las longitudes (mostrados en la tabla 20), se realizó un análisis estadístico en la tabla 30 que permitió establecer el rango de longitudes para colectores en configuración 4-1, donde se alcanza mayor potencia de motor.

Tabla 30.

*Tabla estadística de valoración de potencia al variar la longitud del colector de 500 a 800 mm*

n [rpm]	Longitud de colector [mm]								
	500	550	600	650	700	750	800	688	797
Valor mínimo	57.49	57.54	57.54	57.42	58.33	58.93	59.14	58.02	58.50
Mediana	60.88	62.24	61.63	62.58	62.07	61.79	62.22	62.41	62.78
Valor máximo	69.24	68.43	66.43	68.05	67.95	69.26	67.68	68.32	67.64
Desviación estándar	4.51	4.32	3.70	4.24	3.87	4.27	3.77	4.06	3.94
Rango	11.75	10.89	8.90	10.63	9.63	10.33	8.54	10.30	9.14
Promedio	62.29	62.55	62.11	62.98	63.02	63.07	63.00	62.64	63.09

La figura 60 presenta los valores promedio de potencia para las longitudes de colector entre 500 y 800 mm.

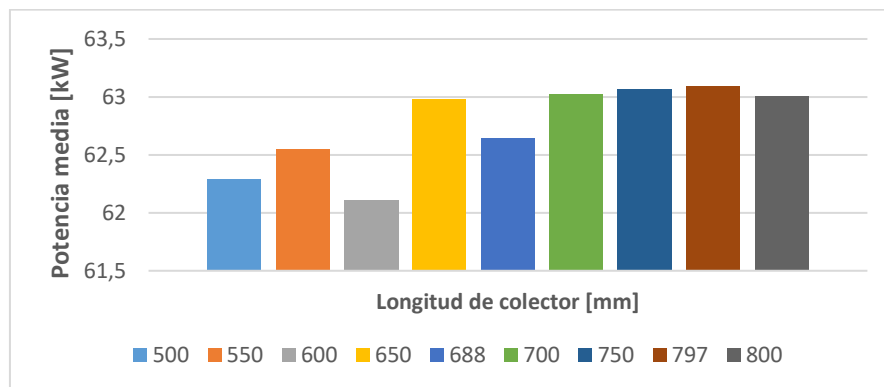


Figura 60. Comparación de potencia para longitudes entre 500 a 800 mm, cada 50 mm

La mejor prestación de motor, del análisis de datos, se obtiene con longitudes del múltiple 4-1 entre 650 a 800 mm. En este rango, el análisis mostrado en la tabla 31 y la figura 61 definen la longitud en donde la potencia promedio es más elevada.

Tabla 31.

*Tabla estadística de valoración de potencia al variar la longitud del colector de 650 a 800 mm*

n [rpm]	Longitud de colector [mm]						
	650	675	700	725	750	775	800
Valor mínimo	57.42	57.95	58.33	57.97	58.93	58.99	59.14
Mediana	62.58	62.92	62.07	62.54	61.79	62.63	62.22
Valor máximo	68.05	67.56	67.95	68.37	69.26	68.83	67.68
Desviación estándar	4.24	3.80	3.87	4.11	4.27	4.10	3.77
Rango	10.63	9.61	9.63	10.40	10.33	9.84	8.54
Promedio	62.98	62.68	63.02	62.80	63.07	63.46	63.00

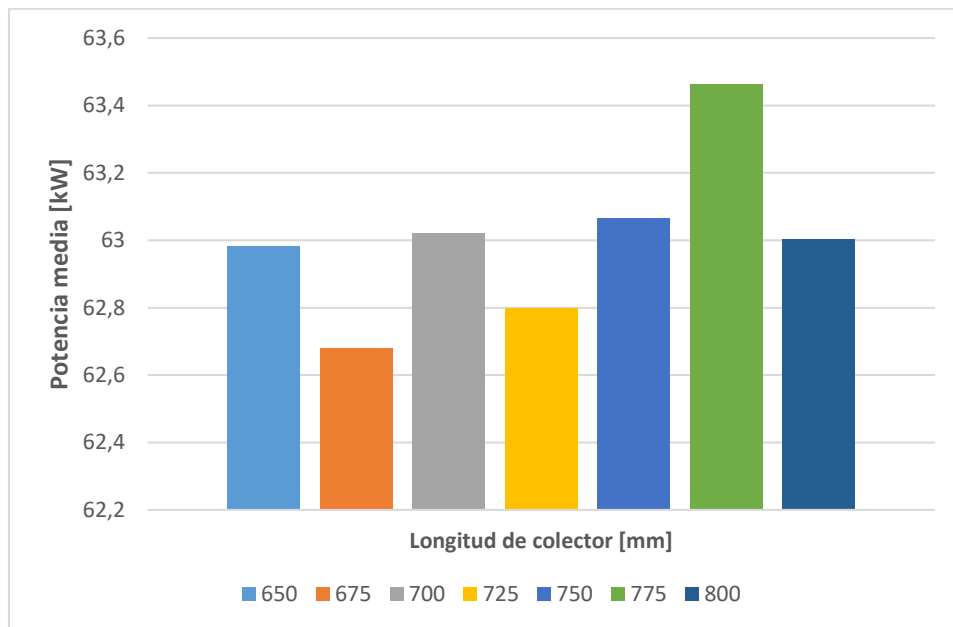


Figura 61. Comparación de potencia para longitudes entre 650 a 800 mm, cada 25 mm

Se establece entonces que se alcanza mayor rendimiento de motor al usar conductos de 775 mm de longitud en el múltiple de escape 4-1.

**Análisis comparativo entre configuraciones.**

Para el análisis referente al desempeño del motor según la configuración de múltiple de escape, se realizó la comparación de acuerdo a las longitudes que alcanzan mayor rendimiento que el sistema original. Para la configuración 4-2-1 se analizó con los resultados de las dimensiones de colector primario de 350 mm y secundario de 400 mm; para la configuración 4-1 se utilizó, el colector de 775 mm de longitud.

Se elaboró una tabla estadística que permitió trabajar con los valores máximos de potencia y torque, puesto que en un vehículo de competencia se busca incrementar este valor. Como se presenta en la tabla 32.

Tabla 32.

*Tabla estadística de valoración de torque y potencia según la configuración del múltiple*

n [rpm]	Múltiple Original		Configuración 4-2-1		Configuración 4-1	
	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
2500	25.11	95.91	25.42	97.10	24.81	94.76
3500	38.56	105.21	38.61	105.35	38.59	105.28
4500	45.42	96.38	43.77	92.89	45.48	96.50
5500	58.51	101.58	59.42	103.16	58.99	102.43
6000	60.15	95.73	61.30	97.57	60.44	96.19
6500	62.52	91.84	63.40	93.15	62.63	92.02
7000	62.36	85.07	64.75	88.33	66.41	90.60
7500	61.60	78.43	63.00	80.22	68.83	87.64
Valor mínimo	25.11	78.43	25.42	80.22	24.81	87.64
Cuartil 1	43.70	90.15	42.48	91.75	43.75	91.66
Mediana	59.33	95.82	60.36	95.12	59.72	95.47
Cuartil 3	61.79	97.68	63.10	98.96	63.58	97.98
Valor máximo	62.52	105.21	64.75	105.35	68.83	105.28
Desviación estándar	13.97	8.63	14.67	8.06	15.46	5.90
Rango	37.41	26.78	39.33	25.13	44.02	17.64
Promedio	51.78	93.77	52.46	94.72	53.27	95.68

Se establece entonces, que la configuración 4-2-1 permite alcanzar mejores resultados de desempeño de motor en los rangos medios de revoluciones, mientras que la configuración 4-1 lo hace en altas velocidades de giro. De igual manera, en la configuración 4-1 se alcanza el máximo valor de potencia.

La figura 62 presenta el valor de elevación de potencia máxima según las configuraciones 4-2-1 y 4-1, respecto al múltiple original.

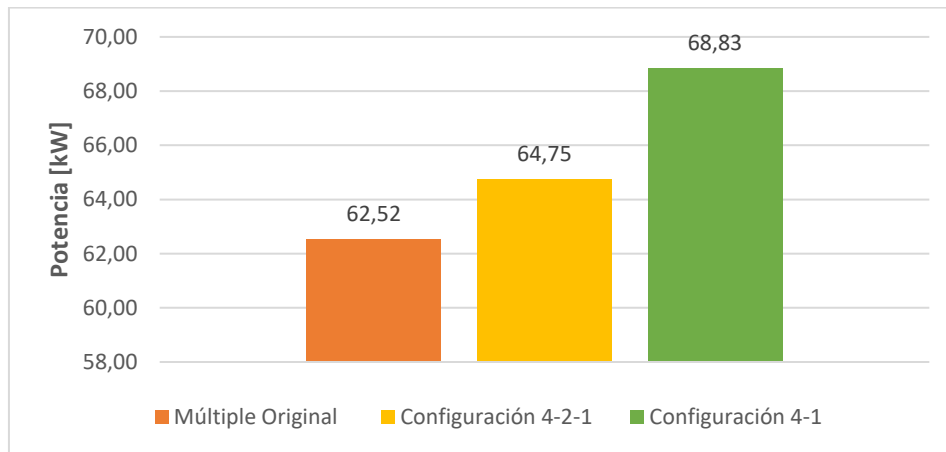


Figura 62. Comparación de potencia máxima según configuración de múltiple

En la figura 63 se presenta los porcentajes de incremento de potencia al modificar la configuración el múltiple de escape, en relación al sistema original.

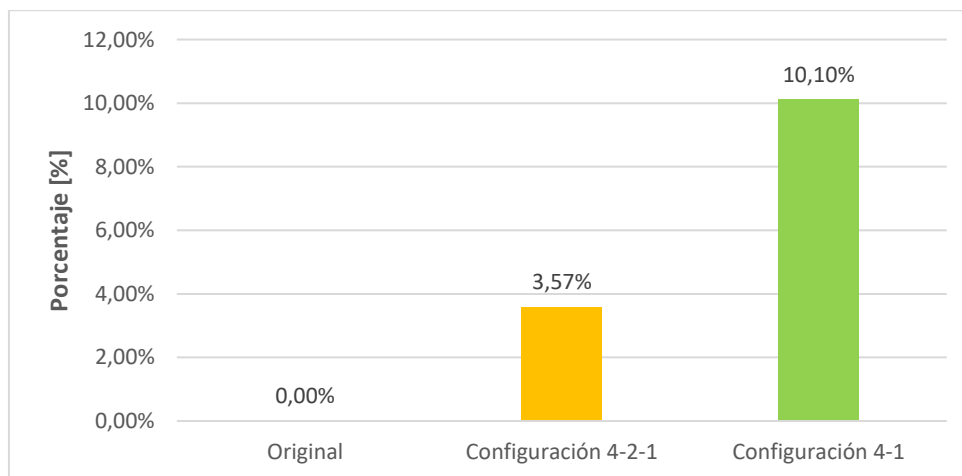


Figura 63. Porcentaje de variación de potencia máxima según configuración de múltiple



Existe un aumento de potencia máxima de 3.57 % con las longitudes apropiadas en la configuración 4-2-1, mientras que se incrementa un 10.1 % usando la configuración 4-1, respecto al múltiple original.

En la figura 64 se muestran los valores de torque máximo para los dos tipos de configuraciones de múltiple y el sistema original.

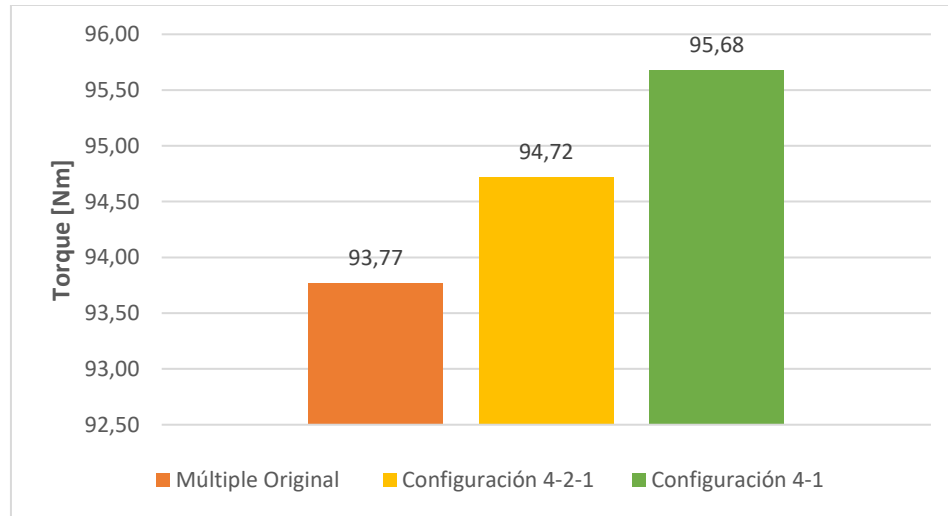


Figura 64. Comparación de torque máximo según configuración de múltiple

Los porcentajes de variación de torque máximo según el tipo de configuración respecto al múltiple original se indican en la figura 65.

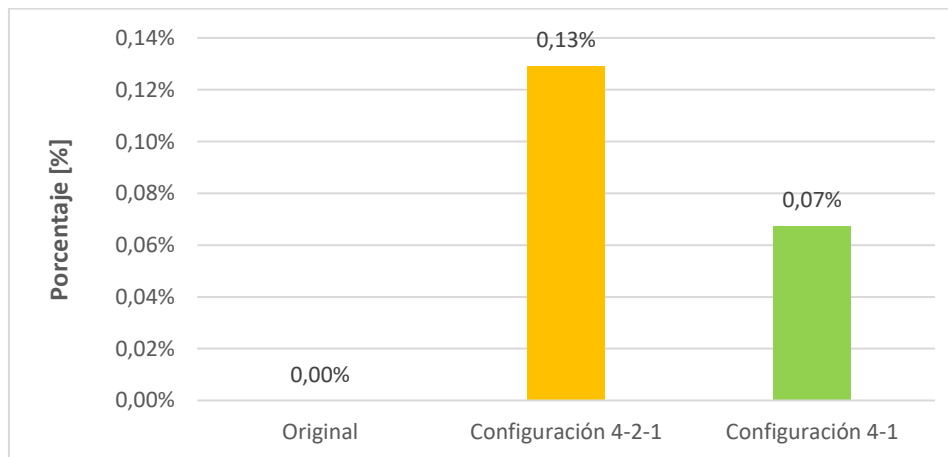


Figura 65. Porcentaje de variación de torque máximo según configuración de múltiple

De acuerdo a los datos analizados el incremento de torque máximo es prácticamente nulo, sin embargo, la configuración 4-1 presenta menor variación entre el valor máximo y mínimo, lo que indica un menor descenso de par motor en todo el rango de revoluciones.

### Simulación 3D

Para el análisis de resultados de la simulación computacional tridimensional se considera la velocidad y presión del fluido en los diseños de múltiples 4-2-1 y 4-1, respecto al original.

#### Análisis estático.

Con los valores obtenidos del estudio CFD estático se realizó un análisis estadístico en cuanto a velocidad y presión de los gases dentro de los múltiples, utilizando los valores promedio. En la tabla 33 se muestran los valores en la entrada de los colectores correspondientes para cada diseño.

Tabla 33.

*Tabla estadística de los parámetros en la entrada del múltiple*

Valores	Original		Configuración 4-2-1		Configuración 4-1	
	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]
Cilindro 1	57.2581	116719	74.1709	115865	80.5424	115484
Cilindro 2	60.4489	116574	73.7395	115885	79.5314	115547
Cilindro 3	59.3736	116623	78.718	115597	77.6971	115657
Cilindro 4	61.6388	116518	79.7142	115541	77.8751	115643
Valor mínimo	57.26	116518	73.74	115541	77.70	115484
Mediana	59.91	116599	76.44	115731	78.70	115595
Valor máximo	61.64	116719	79.71	115885	80.54	115657
Desviación estándar	1.86	85	3.07	178	1.37	82
Rango	4.38	201	5.97	344	2.85	173
Promedio	59.68	116609	76.59	115722	78.91	115583

En la figura 66 se presenta los valores de incremento de velocidad en el ingreso del múltiple de escape.

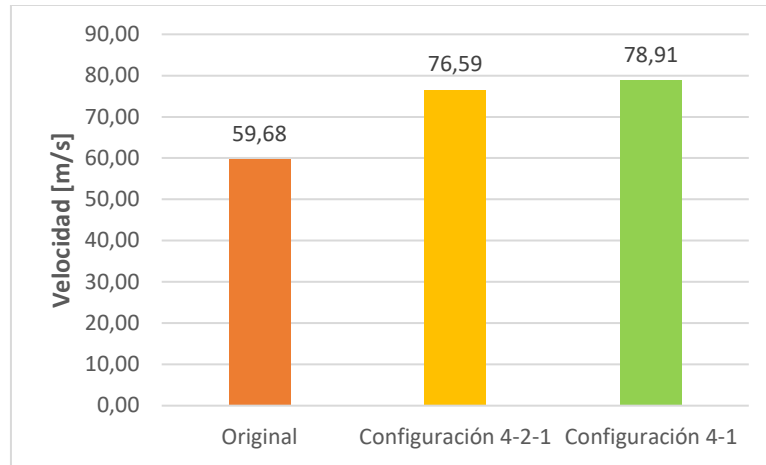


Figura 66. Resumen de velocidad de entrada según el múltiple de escape

La figura 67 indica los porcentajes de aumento de velocidad en el ingreso del múltiple de escape con los diseños propuestos, en relación al colector original.

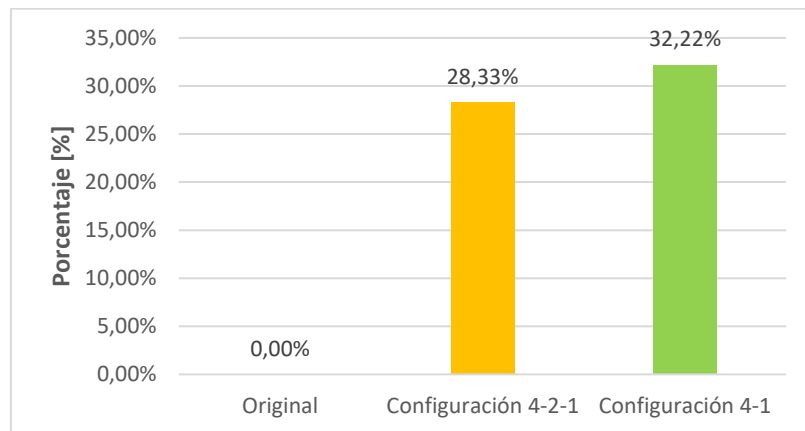


Figura 67. Porcentaje de variación de velocidad de entrada

Se establece que existe un incremento de velocidad en la entrada del múltiple de escape entre 28 % y 32 % para los diseños propuestos, con respecto al modelo original.

La figura 68 presenta los valores de presión en la entrada de cada múltiple de escape.

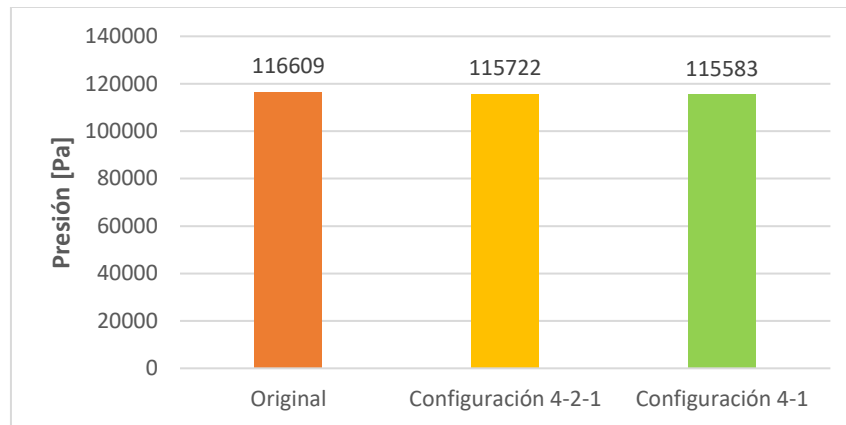


Figura 68. Resumen de presión en la entrada según el múltiple de escape

La figura 69 muestra los porcentajes de variación de presión en la entrada del colector, con respecto al original.

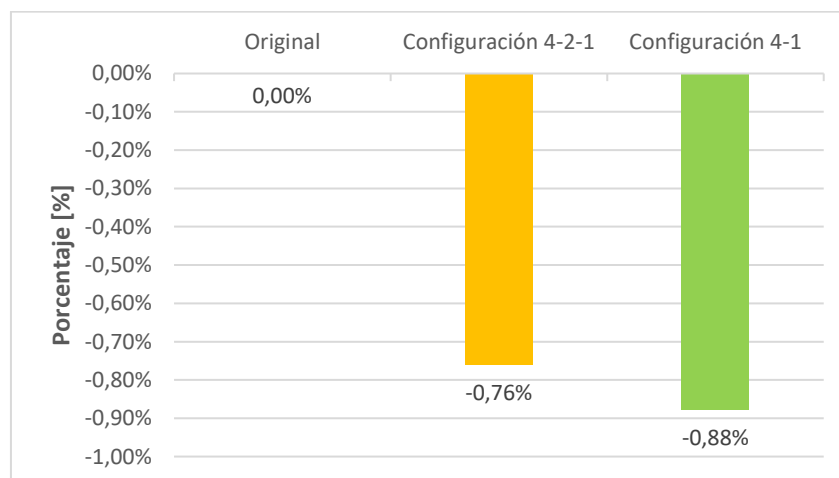


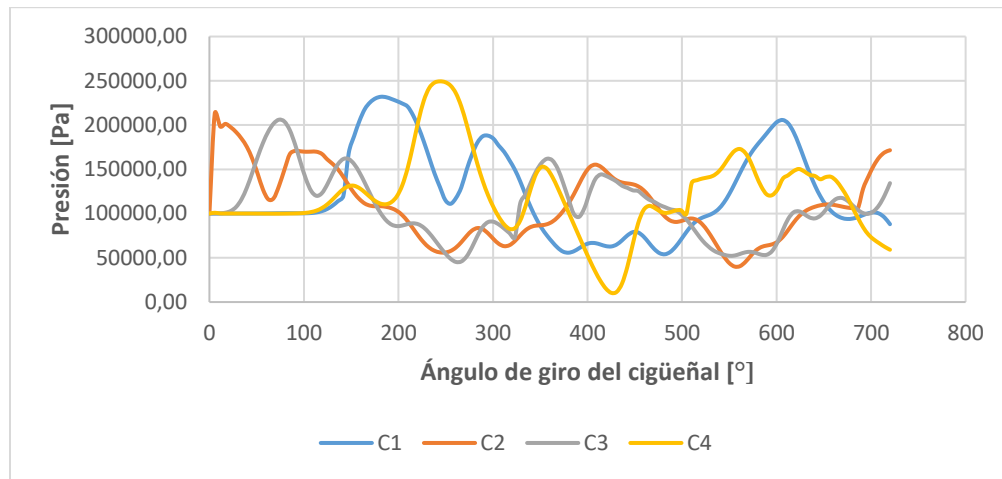
Figura 69. Porcentaje de variación de presión de entrada

Según los resultados del análisis estático la variación de presión en la entrada es mínima en relación al múltiple original.

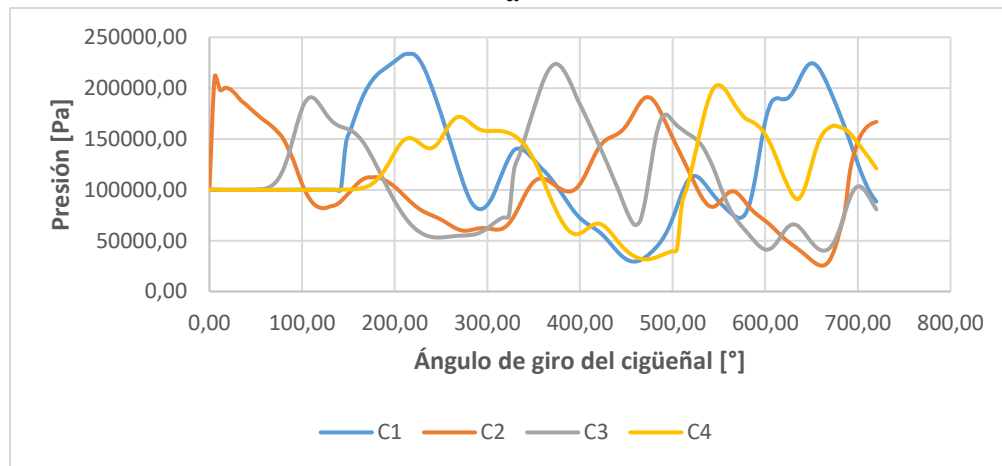
### **Análisis transitorio.**

Los resultados del estudio transitorio permitieron verificar el cambio de los parámetros del fluido en el tiempo, para los diseños propuestos y el múltiple original. En la figura 70 se muestra

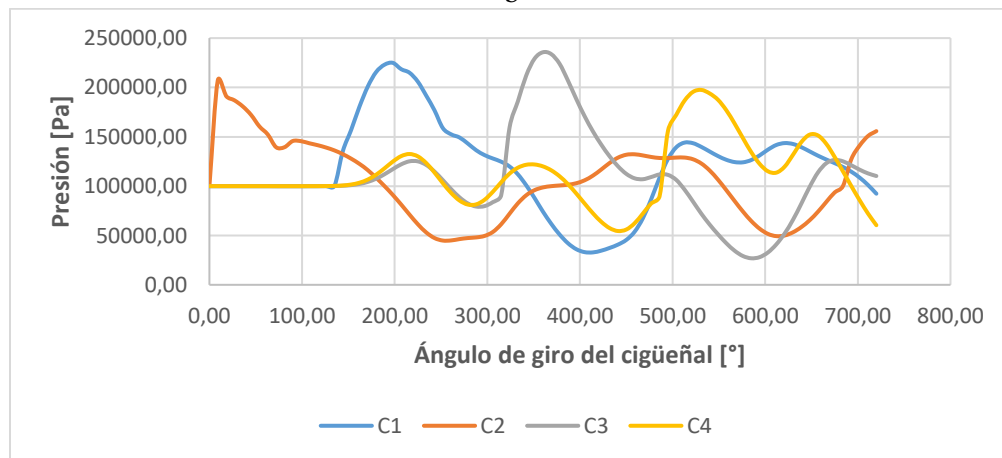
las curvas de presión en la entrada del múltiple para cada modelo, respecto al ángulo de giro del cigüeñal.



a



b



c

Figura 70. Presión a la entrada del múltiple de escape: (a) original, (b) configuración 4-2-1, (c) configuración 4-1

Al analizar las curvas, se observa que en la configuración 4-2-1 la presión generada en un ingreso incide sobre la entrada correspondiente del cilindro desfasado  $180^\circ$  según el orden de encendido del motor, mientras que, en la configuración 4-1 no se presenta este fenómeno. En el múltiple original, se observa un efecto similar al mencionado puesto que consiste en una configuración 4-2-1, sin embargo, no existe una sintonización adecuada como en el diseño 4-2-1 propuesto, por efecto de las longitudes poco equilibradas entre colectores.

Según los resultados de velocidad en la salida se obtuvo las curvas de la figura 71.

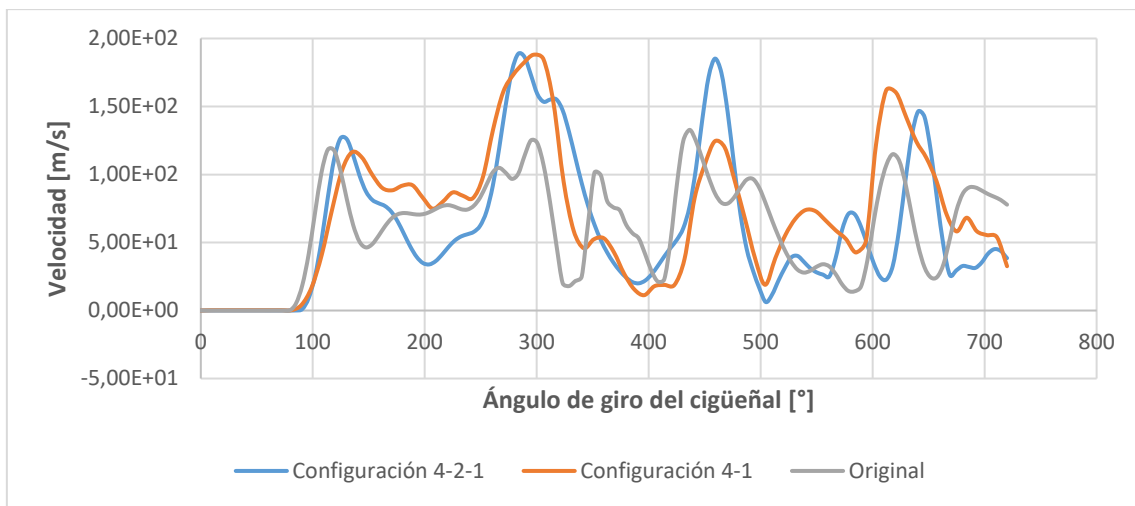


Figura 71. Velocidad en la salida del múltiple de escape

Se realizó una tabla estadística con los resultados de las velocidades promediadas de cada modelo analizado, como se indica en la tabla 34.

Tabla 34.

Tabla estadística de velocidad de salida

Valores	Original	Configuración 4-2-1	Configuración 4-1
Valor mínimo	0.000	0.000	0.000
Mediana	70.659	46.361	67.436
Valor máximo	132.816	188.736	188.031
Desviación estándar	36.750	51.182	50.131
Rango	132.816	188.736	188.031
Promedio	61.020	62.041	70.844

La figura 72 presenta el incremento de velocidad promedio en la salida según las configuraciones analizadas.

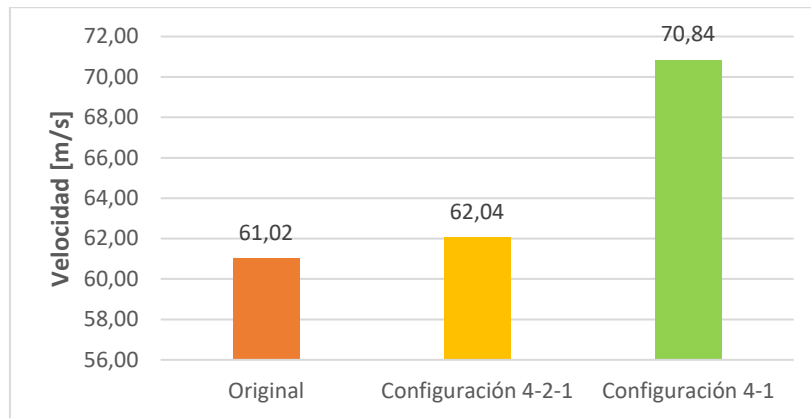


Figura 72. Resumen de velocidad en la salida del múltiple de escape

La figura 73 indica los porcentajes de aumento de velocidad promedio en la salida de los modelos propuestos, respecto al sistema original.

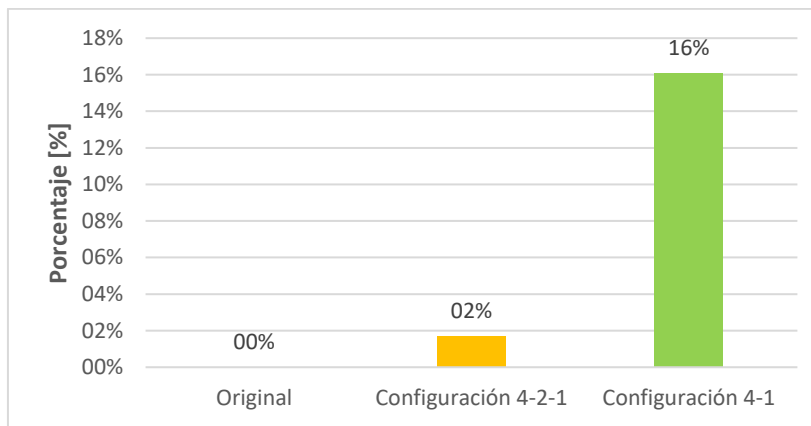


Figura 73. Porcentaje de incremento de velocidad en la salida del múltiple

Se establece entonces que la configuración 4-1 incrementa la velocidad de salida de los gases combustionados en 16 % y 14 %, respecto al múltiple original y el diseño 4-2-1, respectivamente.

### Construcción de Múltiples

Durante la construcción del múltiple de escape se pudo apreciar la deformación de los tubos en la zona de doblado para el múltiple tipo A, a diferencia del tipo B en el cual la sección se mantiene uniforme. En la figura 74 se puede apreciar la diferencia de sección en la zona de curvatura de los tubos utilizados para cada tipo de construcción.

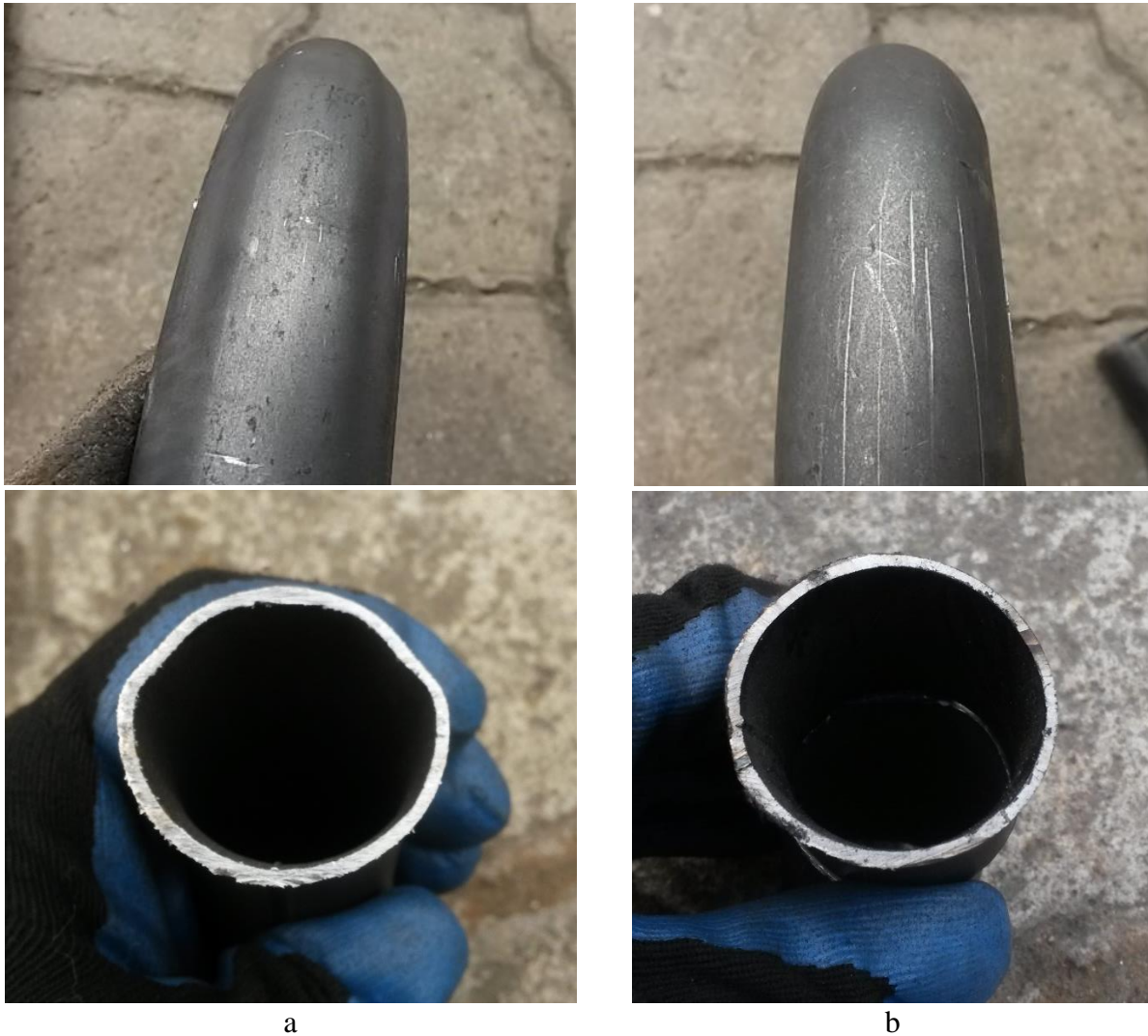


Figura 74. Diferencia de sección en la zona de curvatura de los tubos utilizados para la construcción: (a) tipo A, (b) tipo B

El múltiple de escape tipo B requirió mayor tiempo de construcción por su complejidad y precisión requerida para el corte y unión de cada sección de la tubería.



### Pruebas Dinamométricas

En la figura 75 se observa la comparación de las curvas características de potencia obtenidas en las pruebas dinamométricas con cada múltiple de escape.

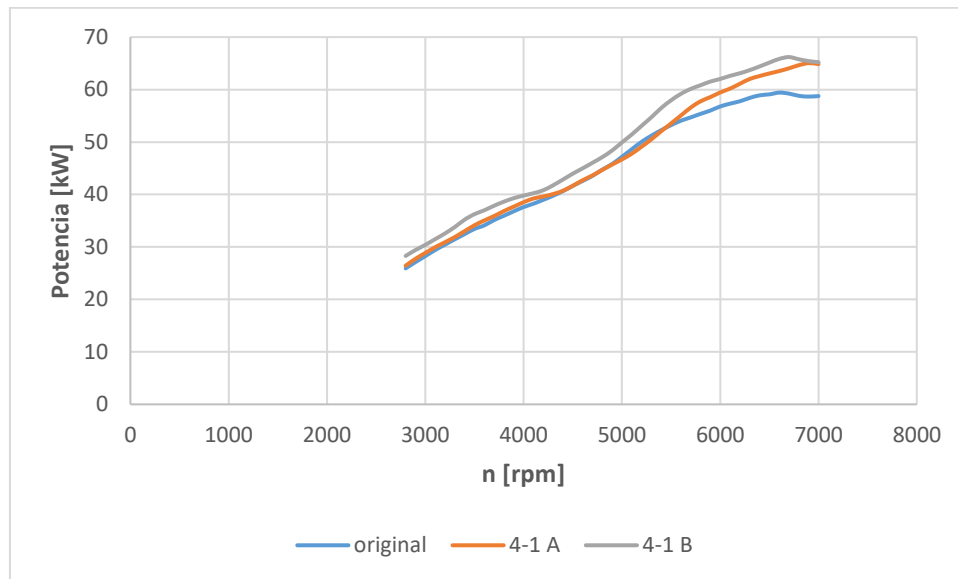


Figura 75. Comparación de curvas de potencia

En la figura 76 se presenta la comparación entre las curvas de torque obtenidas en el dinamómetro de rodillos.

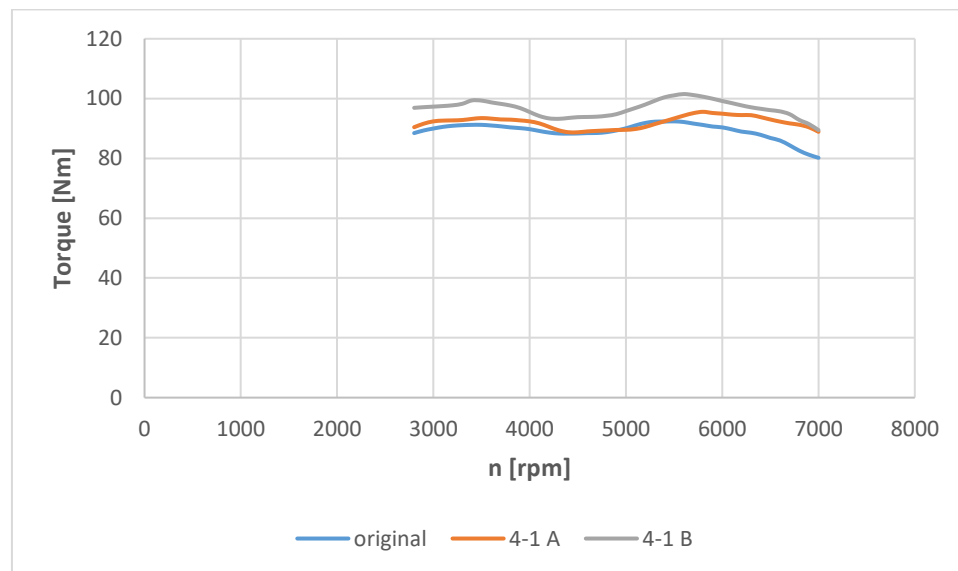


Figura 76. Comparación de curvas de torque

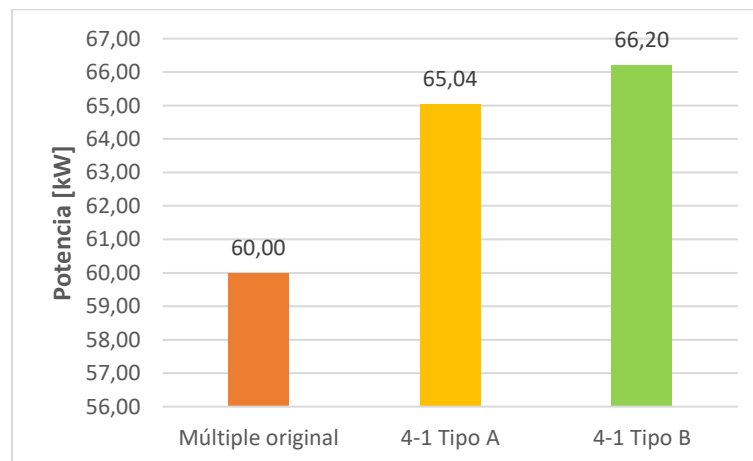
La tabla 35 consiste en una tabla estadística del comportamiento del vehículo Suzuki usando el múltiple original y la configuración 4-1 de construcción tipo A y B.

Tabla 35.

*Tabla estadística de potencia y torque medidos*

Valor	Múltiple original		4-1- Tipo A		4-1 Tipo B	
	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
Máximo prueba 1	59.75	94.21	65.69	94.9	64.25	100.3
Máximo prueba 2	59.06	96.08	61.61	94.4	68.29	101.5
Máximo prueba 3	58.91	82.79	68.62	98.5	64.8	102.2
Máximo prueba 4	62.26	100.24	64.24	97.7	67.44	102.3
Valor mínimo	58.91	82.79	61.61	94.40	64.25	100.30
Mediana	59.41	95.15	64.97	96.30	66.12	101.85
Valor máximo	62.26	100.24	68.62	98.50	68.29	102.30
Desviación estándar	1.55	7.46	2.92	2.03	1.97	0.92
Rango	3.35	17.45	7.01	4.10	4.04	2.00
Promedio	60.00	93.33	65.04	96.38	66.20	101.58

Para el análisis se trabajó con los valores promedio de potencia y torque máximos de cada prueba. En la figura 77 se muestra el valor de elevación de potencia al usar los múltiples de configuración 4-1, respecto al original.



*Figura 77. Comparación de potencia máxima*

El porcentaje de incremento de potencia con los múltiples 4-1 en relación al original, se ve reflejado en la figura 78.

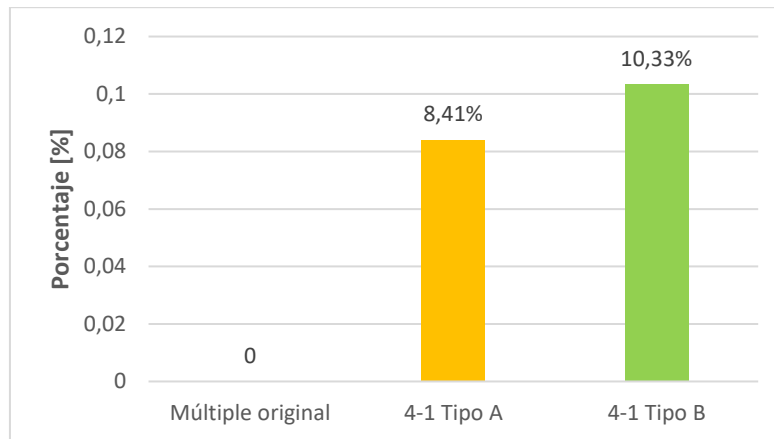


Figura 78. Porcentaje de variación de potencia

Se establece que existe un aumento de potencia de 8.41 % al usar el múltiple de escape 4-1 tipo A y 10.33 % con el tipo B, respecto al colector original del Suzuki GTi. De igual forma se determina que al mantener la sección uniforme de la tubería (tipo B) se alcanza mejores resultados.

La variación de torque según el múltiple de escape usado, se presenta en la figura 79.

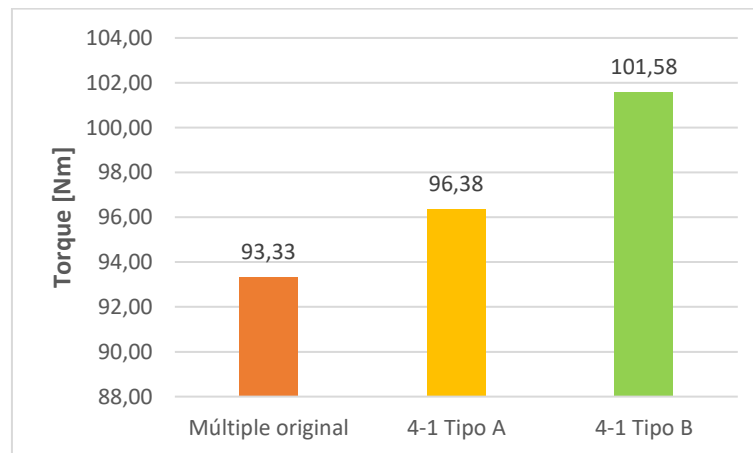


Figura 79. Comparación de torque máximo.

El porcentaje de incremento de torque al usar la configuración 4-1, en relación al múltiple original se indica en la figura 80.

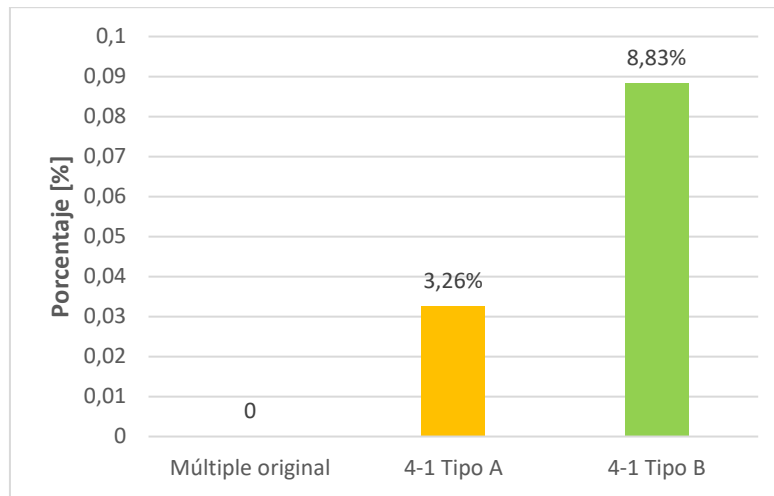


Figura 80. Porcentaje de variación de torque

Conforme a las mediciones existe un incremento en el torque al utilizar la configuración 4-1 de 3.26 % para el tipo A y 8.83 % para el tipo B. De igual forma el proceso de construcción influye fuertemente en los resultados.

### **Comparación entre Resultados de Simulación y Pruebas Dinamométricas**

Las curvas características obtenidas mediante OpenWAM se compararon con los resultados de las pruebas dinamométricas para el múltiple de escape original, configuración 4-1 tipo A y tipo B.

#### **Múltiple original.**

En la figura 81 se observa las curvas de potencia obtenidas del proceso de simulación unidimensional y del ensayo experimental.

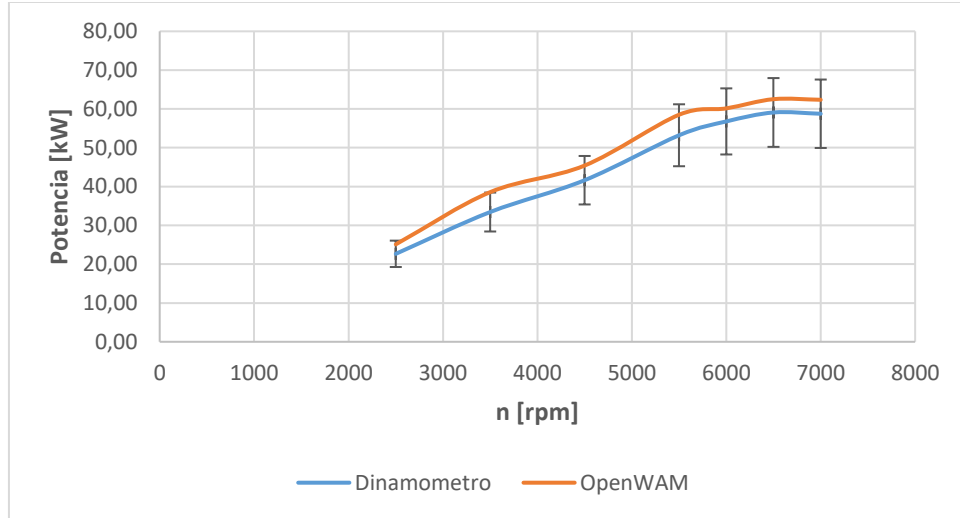


Figura 81. Comparación de curvas de potencia del múltiple original

Pese a la variación en valores numéricos, existe semejanza en la silueta de las curvas, lo cual consiste en un factor determinante al evaluar el comportamiento del motor.

Con los resultados obtenidos de potencia se elaboró una tabla estadística (tabla 36), en la cual se analiza la variación entre el proceso computacional respecto al experimental.

Tabla 36.

*Diferencia de resultados potencia entre simulación y pruebas dinamométricas para múltiple original*

<b>n</b>	<b>Dinamómetro</b>	<b>OpenWAM</b>	<b>Variación</b>
<i>[rpm]</i>	<i>[kW]</i>	<i>[kW]</i>	<i>[%]</i>
2500	22.67	25.1088	11
3500	33.44	38.5623	15
4500	41.63	45.4166	9
5500	53.22	58.5065	10
6000	56.78	60.148	6
6500	59.09	62.5167	6
7000	58.76	62.3627	6
		Valor mínimo	6
		Mediana	9
		Valor máximo	15
		Desviación estándar	3
		Rango	10
		Promedio	9

En la figura 82 se muestra los valores de potencia según las revoluciones, para el método computacional y experimental.

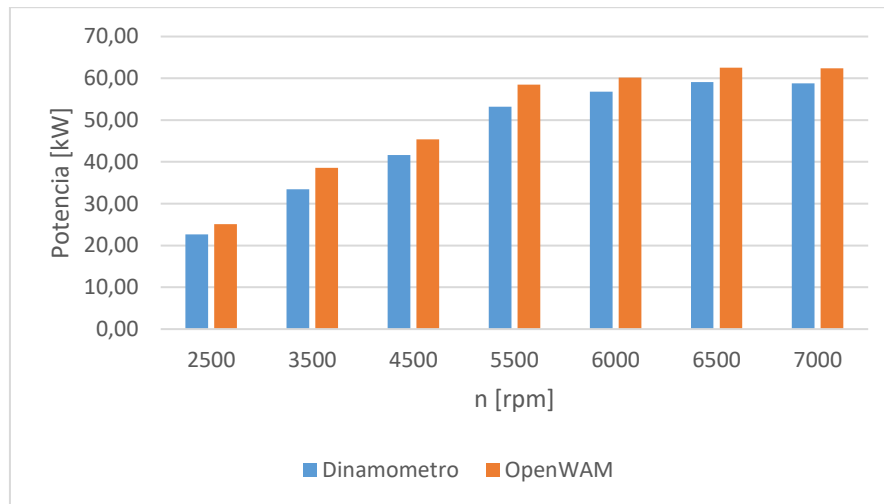


Figura 82. Comparación de resultados de potencia para múltiple original

Los porcentajes de variación de resultados obtenidos del *software* OpenWAM respecto a las pruebas dinamométricas para cada régimen de giro de motor, se presentan en la figura 83.

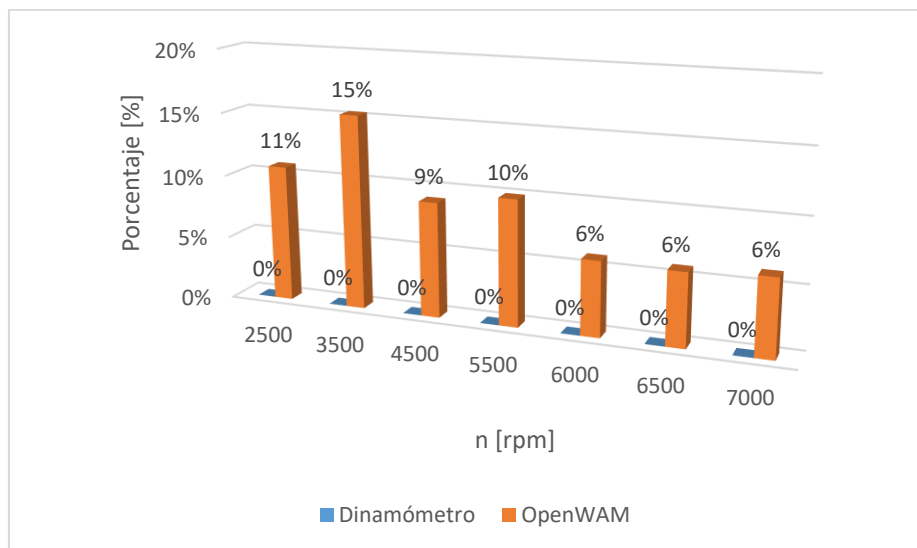


Figura 83. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple original

Se establece un error promedio de 9 % en los resultados de la simulación con respecto a los datos reales obtenidos de las pruebas en dinamómetro. Sin embargo, la diferencia es de apenas 6 % en la zona de interés, es decir, donde la potencia es máxima (sobre las 6 000 rpm), asegurando el proceso computacional.

#### Múltiple configuración 4-1.

Las curvas de potencia extraídas de la simulación 1D se compararon con las obtenidas de las pruebas dinámicas, para el múltiple 4-1 tipo A y tipo B, como se muestra en la figura 84.

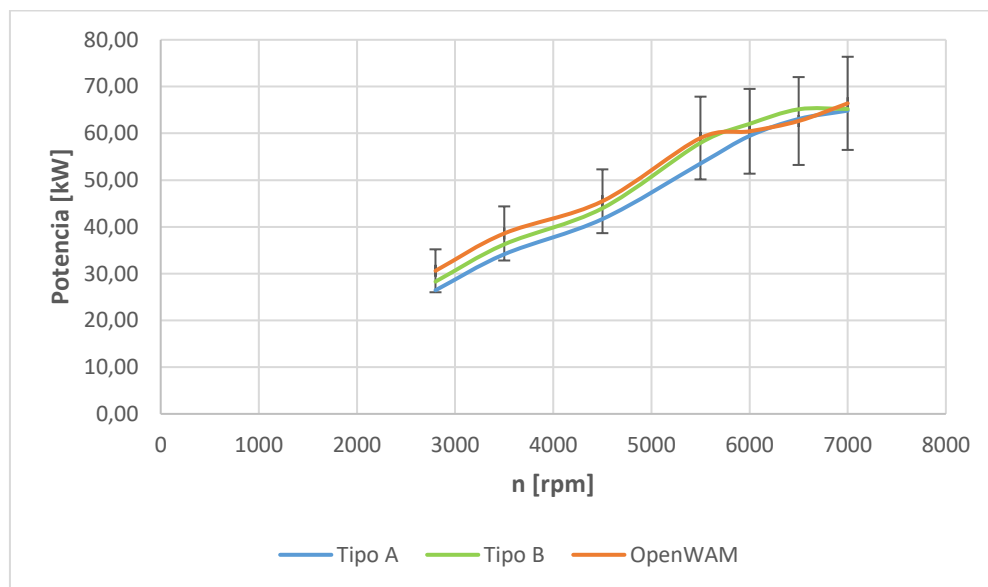


Figura 84. Comparación de curvas de potencia del múltiple 4-1

En la tabla 37 se presenta un cuadro estadístico para analizar la variación de resultados de la simulación 1D respecto al ensayo experimental con el múltiple 4-1 de construcción tipo A y tipo B. Los porcentajes de variación indican de acuerdo a la diferencia entre la simulación y cada tipo de construcción.

Tabla 37.

*Diferencia de resultados potencia entre simulación y pruebas dinamométricas para múltiple 4-1*

n	Dinamómetro: Tipo A	Dinamómetro: Tipo B	1D OpenWAM	Variación 1D-tipo A	Variación 1D-tipo B
[rpm]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
2800	26.44	28.29	30.60	16	8
3500	34.14	36.25	38.59	13	6
4500	41.66	43.97	45.48	9	3
5500	53.54	57.95	58.99	10	2
6000	59.45	62.02	60.44	2	3
6500	63.07	65.14	62.63	1	4
7000	64.86	65.21	66.41	2	2
			Valor mínimo	1	2
			Mediana	9	3
			Valor máximo	16	8
			Desviación estándar	6	2
			Rango	15	6
			Promedio	8	4

En la figura 85 se presenta de manera clara la diferencia de potencia en cada régimen de giro de motor según los datos de potencia obtenidos de la simulación y de las pruebas dinamométricas con el múltiple 4-1 fabricado según los dos métodos.

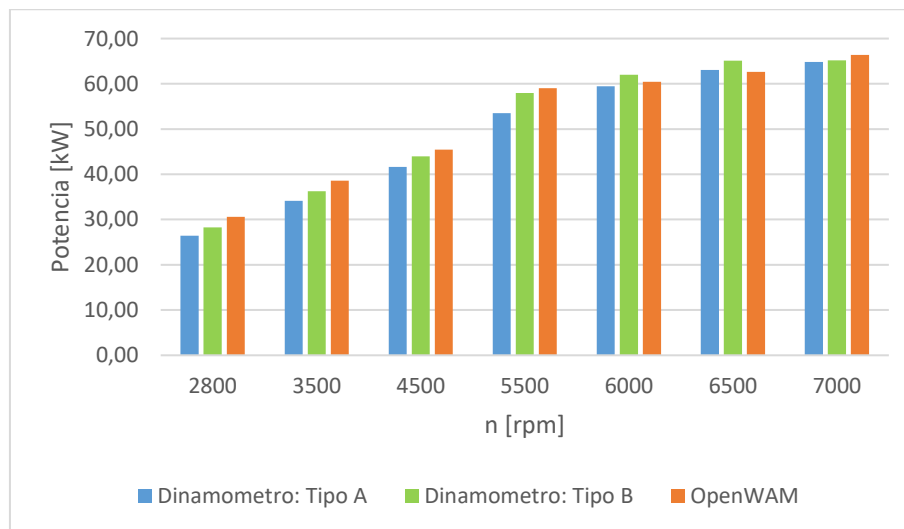


Figura 85. Comparación de resultados de potencia para múltiple 4-1



Los porcentajes de variación de potencia de la simulación 1D respecto a los resultados experimentales con el múltiple 4-1 tipo A se muestran en la figura 86 de color amarillo, mientras que, en azul consta la variación de la simulación en relación al tipo B.

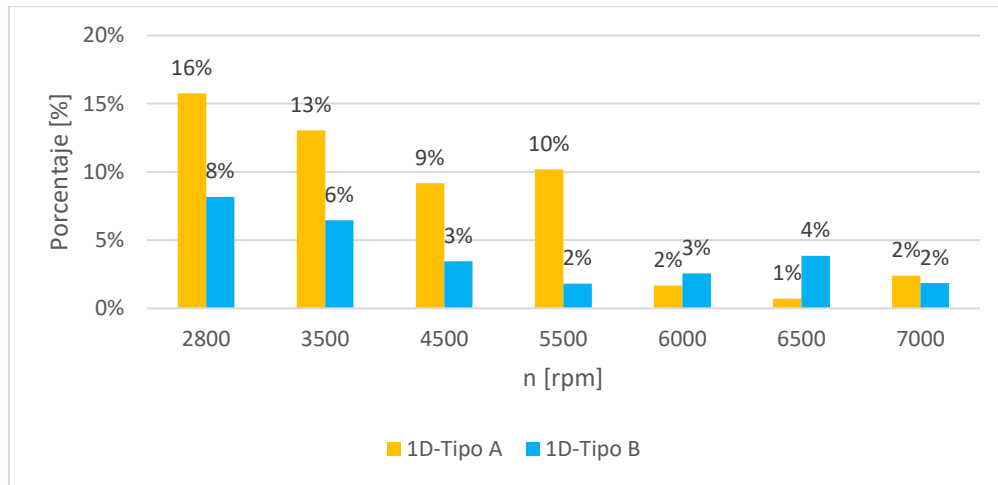


Figura 86. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple 4-1

La variación de resultados de la simulación en OpenWAM respecto a los ensayos experimentales, muestran que existe un error promedio de 8 % en el caso del múltiple de construcción tipo A.

Por otra parte, al comparar los resultados de OpenWAM con las pruebas dinamométricas del múltiple tipo B se tiene una variación promedio de 4 %, con un error mínimo de 1 % a 2 % en altas revoluciones, donde se concentra el interés en la preparación de vehículos de competencia.

Según la comparación de resultados existe mayor diferencia con respecto al múltiple de construcción tipo A, lo que se atribuye al estrechamiento del diámetro de los tubos a causa del doblado de los mismos.

La evaluación de resultados indica, que la simulación computacional mediante el *software* OpenWAM ofrece una respuesta confiable en cuanto al rendimiento del motor, con tiempos de análisis relativamente cortos.

### Conclusiones

Se diseñó el múltiple de escape para el motor G13B del vehículo Suzuki *Twin Cam* 1.3 mediante un proceso de simulación computacional 1D/3D, el cual fue validado con los ensayos experimentales en un banco de pruebas dinamométricas marca MAHA LPS 3000 del Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV), mismo que cuenta con el certificado de calibración según las normas INEN.

Del análisis efectuado, al evaluar la variación de dimensiones en las configuraciones de múltiples de escape 4-1 y 4-2-1, se seleccionó el diseño 4-1, con tubos de 35 mm de diámetro y 775 mm de longitud, puesto que permite alcanzar valores de potencia más elevados en los regímenes de revoluciones altos.

Mediante el modelado en el *software* OpenWAM, según las características del motor G13B del vehículo Suzuki GTi, se obtuvo las curvas de gasto másico en el escape para cada cilindro en función del tiempo, lo que hizo posible ingresarlas como condiciones de frontera en el análisis computacional de fluidos en estado transitorio.

El análisis del flujo en modelos tridimensionales permitió observar la evolución del fluido en el interior de la tubería, lo cual no es posible con el modelo unidimensional; sin embargo, existe mayor gasto computacional con elevados tiempos de cálculo y complejidad de diseño, por lo que con el modelo 1D se puede alcanzar buenas aproximaciones con tiempos de cómputo bajos.

Con el análisis computacional de fluidos en estado transitorio se verificó el efecto de los gases combustionados de un cilindro a otro, lo cual es limitado en el caso estacionario. Se encontró que en la configuración 4-2-1 existe mayor influencia entre las presiones generadas en cada colector,

por lo que se hace necesario una sintonización de escape adecuada conectando los cilindros desfasados  $180^\circ$  según el orden de encendido.

Las velocidades de entrada en los múltiples diseñados aumentan entre 28 % y 32 % respecto al sistema original, lo cual responde al diseño de colectores con entrada rectas y radios de giro más amplios que el modelo de fábrica. Este incremento de velocidad ayuda en la evacuación de los gases combustionados con mayor rapidez.

La configuración 4-1 incrementa la velocidad de salida de los gases combustionados en 16 % y 14 %, respecto al múltiple original y el diseño 4-2-1, respectivamente.

Los valores de potencia y torque obtenidos de la simulación 1D para el múltiple original tienen una diferencia promedio de 9 % con los resultados del dinamómetro de chasis, sin embargo, existe semejanza en la silueta de las curvas características, mediante las cuales se puede predecir el comportamiento del motor sin la necesidad de costosos ensayos experimentales.

En el caso del múltiple 4-1 de construcción tipo A (tubos doblados), existe un error más pronunciado entre los resultados de los ensayos experimentales respecto a la simulación 1D, debido a los cambios de sección transversal de la tubería en la zona de las curvaturas. Mientras que al comparar los resultados computacionales con los ensayos del múltiple 4-1 de construcción tipo B (*step header*) se tiene un error promedio de apenas 4 %.

El modelo unidimensional entrega resultados acordes al funcionamiento del motor, por tanto, es válida su aplicación en la optimización de longitudes y diámetros de múltiples de escape. Una desventaja del modelado 1D, es la necesidad de proporcionar al programa datos experimentales de la geometría y funcionamiento del motor analizado, para la obtención de resultados acertados.

El múltiple de escape propuesto de configuración 4-1 incrementa la potencia máxima respecto al sistema original en 8.41 % y 10.33 %, según la construcción tipo A y tipo B, respectivamente. De igual manera presenta un incremento de torque de 3.26 % para el tipo A y 8.83 % para el tipo B en relación al original. El aporte más significativo al desempeño del motor lo hace en altas revoluciones, esto es, sobre las 5 000 rpm. El diseño, por lo tanto, responde positivamente a la necesidad del vehículo destinado a las carreras de circuito, en donde se mantiene en altas revoluciones durante todo el recorrido.

El método empleado para evaluar el rendimiento del motor, variando la configuración del múltiple de escape y dimensiones mediante la simulación 1D, y analizando el flujo según las formas del múltiple con la simulación 3D, permitió obtener mayor potencia y torque en el motor G13B del vehículo Suzuki *Twin Cam* 1.3. La validez de este método radica en la proximidad de la silueta de las curvas características del motor y la diferencia mínima de los valores, respecto a los datos experimentales obtenidos de las pruebas dinamométricas basadas en la norma INEN 960.

### Recomendaciones

Se recomienda el uso de las simulaciones 1D mediante el *software* OpenWAM, para el diseño de múltiples de escape de otros vehículos equipados con motores de encendido provocado de cuatro tiempos y cuatro cilindros, en los cuales se debe especificar los parámetros del motor conforme a mediciones y datos del fabricante, para adquirir resultados valederos y curvas características de potencia y torque conformes al funcionamiento real.

Se recomienda realizar un estudio para evaluar la influencia en el desempeño del motor al usar otros materiales durante la construcción del múltiple de escape, como tubos galvanizados o acero inoxidable.

Se recomienda el uso de la simulación computacional unidimensional y tridimensional en estado estático para el diseño de múltiples de escape en los rangos de altas revoluciones, lo que permite obtener una buena aproximación de resultados con un costo computacional bajo.

Se recomienda diseñar geometrías de múltiples de construcción sencilla, que pueda llevarse a cabo con los materiales y herramientas disponibles en el medio, reduciendo el número de curvaturas y secciones a fin de facilitar el proceso de ensamblaje y soldadura de todos los miembros del múltiple de escape.

Se recomienda utilizar un factor de corrección de potencia según las normas ISO 1585, JIS D 1001 o SAE J 1349, que permita comparar los valores obtenidos independientemente de las condiciones atmosféricas durante las pruebas dinamométricas, a fin de convertir los valores medidos en valores de referencia para otras condiciones de funcionamiento.

Se recomienda a la Universidad Internacional SEK la implementación de un banco de pruebas dinamométricas calibrado acorde a la normativa INEN, que permita el desarrollo de investigaciones en cuanto a rendimiento de motores de combustión interna y sus sistemas.

**Referencias Bibliográficas**

- ANSYS. (2017). *ANSYS CFX*. Obtenido de <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-CFX>
- Ayala, E. (2015). *Optimització del sistema d'escapament per a un ciclomotor de 49 cm<sup>3</sup>(Tesis de maestría)*. Escola Politècnica Superior, Girona, España.
- Benajes, J., & Navarro, E. (2011). Clasificación de los MCIA. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.), *Motores de combustión interna alternativos* (págs. 24-42). Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Bermúdez, V., & Tormos, B. (2011). Pérdidas mecánicas. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.), *Motores de combustión interna alternativos* (págs. 152-172). Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Billy Boat Exhaust. (2017). *Chevy C5 Corvette Shorty Step Header CARB Legal*. Obtenido de <http://www.bbexhaust.com/shop/chevy-c5-corvette-shorty-step-header-carb-legal/>
- Bisane, R., & Katpatal, D. (2014). Experimental investigation & CFD analysis of an single cylinder four stroke C.I. engine exhaust system. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(06), 50-55. Obtenido de <http://esatjournals.net/ijret/2014v03/i06/IJRET20140306009.pdf>
- Callies, J., Anderson, D., & Prucka, R. (2012). Design of a stepped tube exhaust primary for high performance applications using unsteady computational fluid dynamics. *ASME 2012 Internal Combustion Engine Division, Paper No. ICEF2012-92102* , 915-927.  
doi:10.1115/ICEF2012-92102

- CMT-Motores Térmicos. (2017). *OpenWAM*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <http://www.cmt.upv.es/OpenWam01.aspx>
- Cuadrado, I., Agudelo, J., & Sánchez, C. (2008). *Flujo compresible en múltiples de motores*. Colombia: Universidad de Antioquia.
- Deshmukh, D., Kumar, R., Garg, M., Nayeem, M., & Lakshminarasimhan, V. (2004). Optimisation of Gas Exchange Process on a Single Cylinder Small 4-Stroke Engine by Intake and Exhaust Tuning: Experimentation and Simulation. *SAE Technical Paper*, 2004-32-0007. doi:10.4271/2004-32-0007
- Dietsche, K.-H., & Klingebiel, M. (2005). *Manual de la técnica del automóvil* (Cuarta ed.). Alemania: Reverté.
- Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo. (2017). Reglamento Técnico Campeonato Nacional de Circuito. Obtenido de <http://fedak-ec.org/wp-content/uploads/2016/07/REGLAMENTO-T%C3%89CNICO-CAMPEONATO-NACIONAL-DE-CIRCUITO-2017.pdf>
- Federación Internacional de Automovilismo. (2017). Código Deportivo Internacional. *Anexo J - Artículo 255*. Obtenido de <http://www.fia.com/regulation/categ>
- Federación Internacional del Automóvil. (2017). Código Deportivo Internacional. *Anexo J - Artículo 251*. Obtenido de <http://www.fia.com/regulation/categ>
- Galindo, J., & Hernández, J. (2011). Modelado de motores. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.), *Motores de combustión interna alternativos* (págs. 746-796). Barcelona, España: Editorial Reverté.

- Galindo, J., Luján, J. M., Serrano, J. R., Dolz, V., & Guilain, S. (2004). Design of an exhaust manifold to improve transient performance of a high-speed turbocharged diesel engine. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28, 863-875.  
doi:10.1016/j.expthermflusci.2004.01.003
- Galindo, J., Tiseira, A., Fajardo, P., & Navarro, R. (2011). Coupling methodology of 1D finite difference and 3D finite volume CFD codes based on the Method of Characteristics. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(7-8), 1738-1746.  
doi:10.1016/j.mcm.2010.11.078
- Gillieri, S. (2007). *Preparación de motores de serie para competición*. Barcelona, España: CEAC.
- Heisler, H. (2002). *Advanced engine technology*. London, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Ivan Tighe Engineering Pty Ltd. (2017). *Tighe Cams*. Obtenido de <http://www.tighecams.com.au/GTI%20HYDRAULIC.htm>
- Jawad, B., Biggs, C., & Klein, B. (2002). Exhaust System Design for a Four Cylinder Engine. *SAE Technical Paper*, 2002-01-3316. doi:10.4271/2002-01-3316
- Kanawade, N., & Siras, O. (2015). Design, analysis and development of 4-cylinder IC engine exhaust manifold. *International Engineering Research Journal*, 472-478.
- Lecuona, A., & Rodríguez, P. A. (2011). Parámetros básicos. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.), *Motores de combustión interna alternativos* (págs. 44-69). Barcelona, España: Editorial Reverté.





- Masi, M., Toffolo, A., & Antonello, M. (2010). Experimental analysis of a motorbike high speed racing engine. *Applied Energy*, 87(5), 1641-1650. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.033
- Mohiuddin, A., Rahamn, A., & Dzaidin, M. (2007). Optimal design of automobile exhaust system using GT-Power. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2(1), 40-47.
- Poggiani, C., Cimarello, A., & Grimaldi, C. (2015). Optimization of a fast light-off exhaust system for motorcycle applications. *Energy Procedia*, 82, 75-80.  
doi:10.1016/j.egypro.2015.11.885
- Rocha, J., & Zambrano, V. (2015). *Análisis del funcionamiento del motor de encendido provocado, debido a la presencia de aditivos*(Tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Rodríguez, P., & Nogueira, J. (2011). Curvas características y aplicaciones. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.), *Motores de combustión interna alternativos* (págs. 952-978). Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Rosas, Á., & Barona, G. (2011). *Elaboración de un manual de mantenimiento para el dinamómetro de chasis LPS 3000, instalado en el centro de transferencia tecnológica para ala capacitación e investigación en control de emisiones vehiculares* (CCICEV)(Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Sammut, G., & Alkidas, A. (2007). Relative Contributions of Intake and Exhaust Tuning on SI Engine Breathing - A Computational Study. *SAE Technical Paper*, 2007-01-0492.  
doi:10.4271/2007-01-0492

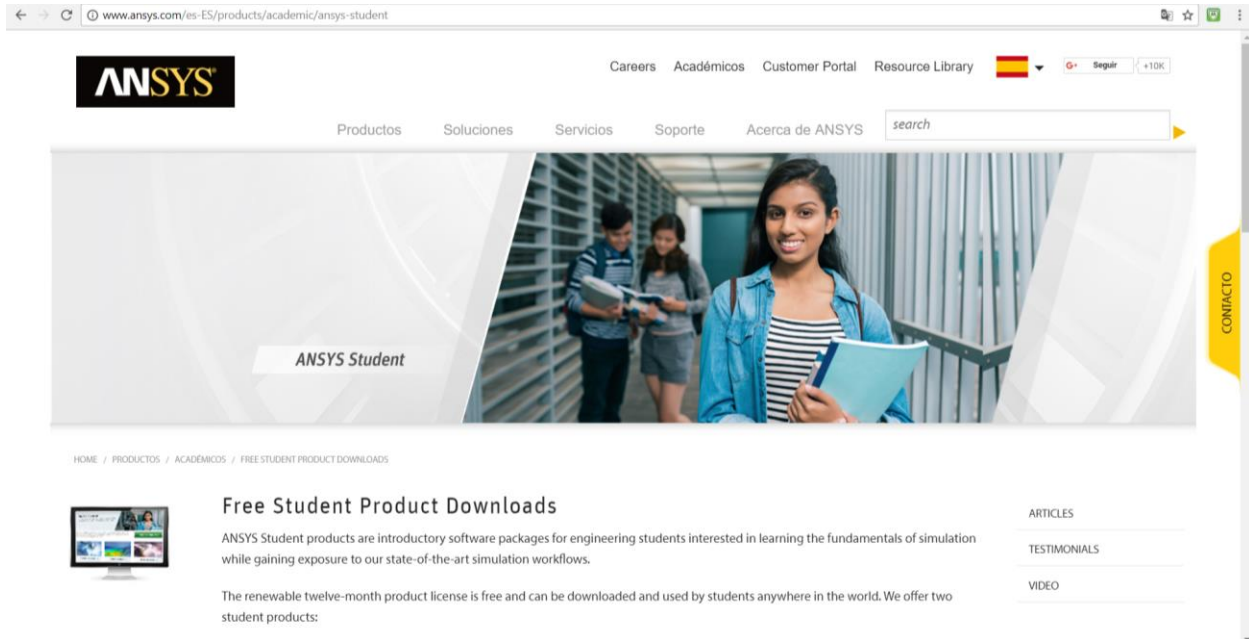
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2012). *Transformación de la Matriz Productiva*. Obtenido de [http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/01/matriz\\_productiva\\_WEBtodo.pdf](http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/01/matriz_productiva_WEBtodo.pdf)
- Serrano, J., & Galindo, J. (2011). Renovación de la carga en motores 4T. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.), *Motores de combustión interna alternativos* (págs. 202-237). Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Suzuki Motor Co. Ltd. (Agosto de 1988). Suzuki Swift. *Service Manual 1300 GTi*. Japón.
- Teodosio, L., Attilio, R., & Nonatelli, F. (2015). A 1D/3D methodology for the prediction and calibration of a high performance motorcycle SI engine. *Energy Procedia*, 82, 936-943. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.842
- Torregrosa, A., & Giménez, B. (2011). Flujo en conductos de admisión y escape. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.), *Motores de combustión interna alternativos* (págs. 174-200). Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Vivekanand, N., & Siddaveer, S. (2014). CFD Analysis of exhaust manifold of multi-cylinder petrol engine for optimal geometry to reduce back pressure. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(3), 92-97. Obtenido de [www.ijert.org](http://www.ijert.org)

Anexos

Anexo 1. Ficha Técnica Suzuki 1.3

SPECIFICATIONS						
	4-Dr. Sedan		3-Dr. Sport Coupe		3-Dr. Hatchback	
	GA	GS	GT	GA	GT	GS
<b>ENGINE/DRIVE TRAIN</b>	In-line 4-cylinder, SOHC 1298 cc (79.2 cu. in.) 70 hp @ 6000 rpm 74 lb-ft @ 3500 rpm Electronic throttle body fuel injection		In-line 4-cylinder, DOHC, 16-valve 1298 cc (79.2 cu. in.) 100 hp @ 6500 rpm 83 lb-ft @ 5000 rpm Electronic multipoint fuel injection		In-line 4-cylinder, SOHC 1298 cc (79.2 cu. in.) 70 hp @ 6000 rpm 74 lb-ft @ 3500 rpm Electronic throttle body fuel injection	
Engine type	9.5:1		10.0:1		9.5:1	
Displacement	5-spd. manual 3-spd. automatic (opt.)		5-spd. manual		5-spd. manual 3-spd. automatic (opt.)	
Horsepower (SAE net)	Dry, single disc		Dry, single disc		Dry, single disc	
Torque (SAE net)	Manual/Auto.		Manual		Manual/Auto.	
Induction system	3.416/2.810		3.416		3.416/2.810	
Compression ratio	1.894/1.549		1.894		1.894/1.549	
Transmission type	1.280/1.000		1.280		1.280/1.000	
Clutch type	0.914/N/A		0.914		0.914/N/A	
Gear ratios (1)	0.757/N/A		0.757		0.757/N/A	
1st	3.272/2.296		3.272		3.272/2.296	
2nd	3.523/3.506		4.105		3.523/3.506	
3rd						
4th						
5th						
Reverse						
Final Drive Ratio						
<b>CHASSIS/SUSPENSION</b>	Welded, unitized construction Rack-and-pinion   Dir. rack-and-pinion Independent MacPherson struts and front stabilizer bar		Welded, unitized construction Rack-and-pinion Independent MacPherson struts and front and rear stabilizer bars		Welded, unitized construction Rack-and-pinion Independent MacPherson struts and front stabilizer bar	
Body design	Power-assisted (front disc/rear drum) 31.5 ft.		Power-assisted (4-wheel discs) 30.2 ft.		Power-assisted (front disc/rear drum) 30.2 ft.	
Steering type	Styled-steel 13x4.5J		Styled-steel 14x 5J		Styled-steel 13x 4.5J	
Suspension	Steel-belted radials P155/70R13		Steel-belted radials P175/60R14		Steel-belted radials P155/70R13	
Brake system						
Turning circle diameter, curb to curb						
Wheels						
Type						
Size						
Tires (blackwalls)						
Type						
Size						
<b>EXTERIOR DIMENSIONS</b>	93.1 in (2365 mm) 161.2 in (4095 mm) 62.6 in (1590 mm) 53.5 in (1360 mm) 53.7 in (1365 mm)/52.8 in (1340 mm)		89.2 in (2265 mm) 147.4 in (3745 mm) 62.4 in (1585 mm) 52.4 in (1330 mm) 53.7 in (1365 mm)/52.8 in (1340 mm)		89.2 in (2265 mm) 147.4 in (3745 mm) 62.6 in (1590 mm) 52.4 in (1330 mm) 53.7 in (1365 mm)/52.8 in (1340 mm)	
<b>INTERIOR DIMENSIONS</b>	39.1/37.7 in 42.5/32.0 in 51.0/50.4 in		37.8/36.5 in 42.5/29.8 in 51.0/50.5 in		37.8/36.5 in 42.5/29.8 in 51.0/50.6 in	
Headroom (front/rear)						
Legroom (front/rear)						
Shoulder room (front/rear)						
<b>CAPACITIES/WEIGHTS</b>	4 11.5 10.6 U.S. gal (40.0 L)		4 10.3 10.6 U.S. gal (40.0 L)		4 10.3 10.6 U.S. gal (40.0 L)	
Seating capacity						
Luggage capacity, rear seatback up (cu.ft.)						
Fuel tank (gallons)						
Curb weight	1894 (859 Kg) 1918 (870 Kg)		1951 lbs (885 Kg) N/A		1781 lbs (808 Kg) 1839 lbs (834 Kg)	
Manual	1953 (886 Kg) 1991 (903 Kg)		2625 lbs (1191 Kg)		2515 lbs (1141 Kg)	
Automatic	2625 lbs (1191 Kg)					
Gross vehicle weight rating						
<b>EPA FUEL ECONOMY ESTIMATES</b>	5-spd. manual City mpg: 37 Highway mpg: 43		5-spd. manual City mpg: 28 Highway mpg: 35		5-spd. manual City mpg: 37 Highway mpg: 43	
3-spd. automatic	City mpg: 29 Highway mpg: 34		City mpg: N/A Highway mpg: N/A		City mpg: 29 Highway mpg: 34	
<b>EXTERIOR COLORS:</b>						
Specifications and equipment based on information available at time of printing and subject to change without notification. Some vehicles shown with optional equipment; see Specifications charts. For more details on 1994 options, accessories and specifications, contact your local Suzuki dealer.	Polar White    Flash Red    Pearl Red    Quasar Blue    Midnight Blue Metallic    Midnight Black Metallic					
<b>DRIVE RESPONSIBLY. BUCKLE UP FOR SAFETY - DON'T DRINK AND DRIVE.</b>	Vehicle: GT Sport Coupe    GT Sport Coupe    GA, GS Sedan    GA Hatchback    GA, GS Sedan    GT Sport Coupe GA Hatchback    GA Hatchback GA, GS Sedan					
	Swift GT comes with black interior.    Swift GA & GS come with gray interior.					

## Anexo 2. Licencia Estudiantil de ANSYS



The screenshot shows the ANSYS website page for 'Free Student Product Downloads'. The browser address bar displays 'www.ansys.com/es-ES/products/academic/ansys-student'. The page features the ANSYS logo, navigation menus for 'Careers', 'Académicos', 'Customer Portal', and 'Resource Library', and a search bar. A large banner image shows a smiling student in a library. Below the banner, the text 'ANSYS Student' is visible. The main content area is titled 'Free Student Product Downloads' and includes a small image of a laptop displaying simulation software. The text describes the introductory software packages for engineering students and mentions a renewable twelve-month license. A sidebar on the right contains links for 'ARTICLES', 'TESTIMONIALS', and 'VIDEO'. A vertical yellow bar on the right edge of the page is labeled 'CONTACTO'.

www.ansys.com/es-ES/products/academic/ansys-student

Careers Académicos Customer Portal Resource Library Seguir +10K

Productos Soluciones Servicios Soporte Acerca de ANSYS search

ANSYS Student

HOME / PRODUCTOS / ACADÉMICOS / FREE STUDENT PRODUCT DOWNLOADS

### Free Student Product Downloads

ANSYS Student products are introductory software packages for engineering students interested in learning the fundamentals of simulation while gaining exposure to our state-of-the-art simulation workflows.

The renewable twelve-month product license is free and can be downloaded and used by students anywhere in the world. We offer two student products:

ARTICLES  
TESTIMONIALS  
VIDEO

CONTACTO

**Anexo 3: Propiedades del material ASTM A500****ASTM A500 Steel, grade C, shaped structural tubing****Categories:** [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [ASTM Steel](#); [Carbon Steel](#); [Low Carbon Steel](#)**Material Notes:** The Cu content of 0.18% is a minimum content when copper steel is specified.**Key Words:** copper steels, copper-steels, UNS K02705**Vendors:** [Click here to view all available suppliers for this material.](#)Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	Typical of ASTM Steel
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	425 MPa	61600 psi	
Tensile Strength, Yield	345 MPa	50000 psi	
Elongation at Break	21.0 %	21.0 %	
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel
Material Components Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	<= 0.270 %	<= 0.270 %	
Copper, Cu	<= 0.18 %	<= 0.18 %	
Iron, Fe	98.0 %	98.0 %	
Manganese, Mn	<= 1.40 %	<= 1.40 %	
Phosphorous, P	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
Sulfur, S	<= 0.0630 %	<= 0.0630 %	

**References** for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

MS500F / 13954

Fuente: (Eagle National Steel, 2016) [https://eaglesteel.com/wp-content/uploads/2016/04/ASTM\\_A500\\_Grade\\_C.pdf](https://eaglesteel.com/wp-content/uploads/2016/04/ASTM_A500_Grade_C.pdf)

## Anexo 4: Ficha técnica dinamómetro MAHA LPS 3000

**R 200/2**

BANCOS DE FUNCIONES Y POTENCIA

**POWERDYNO**

VP 430004

Juego de rodillos para turismos, camiones, autobuses

**DESCRIPCIÓN:**

- Juego de rodillos separado autoportante para un mejor acceso durante el arrastre del vehículo
- Barrera de elevación hidráulica
- Árbol de cardán para la conexión de ambos rodillos de carga
- Pintura recubrimiento en polvo de alta calidad: azul geniana, RAL 5010 (bastidor del banco de pruebas, cubiertas)
- Rodillos de carga lacadas, rojo rubí, RAL 3003

**DATOS TECNICOS:**

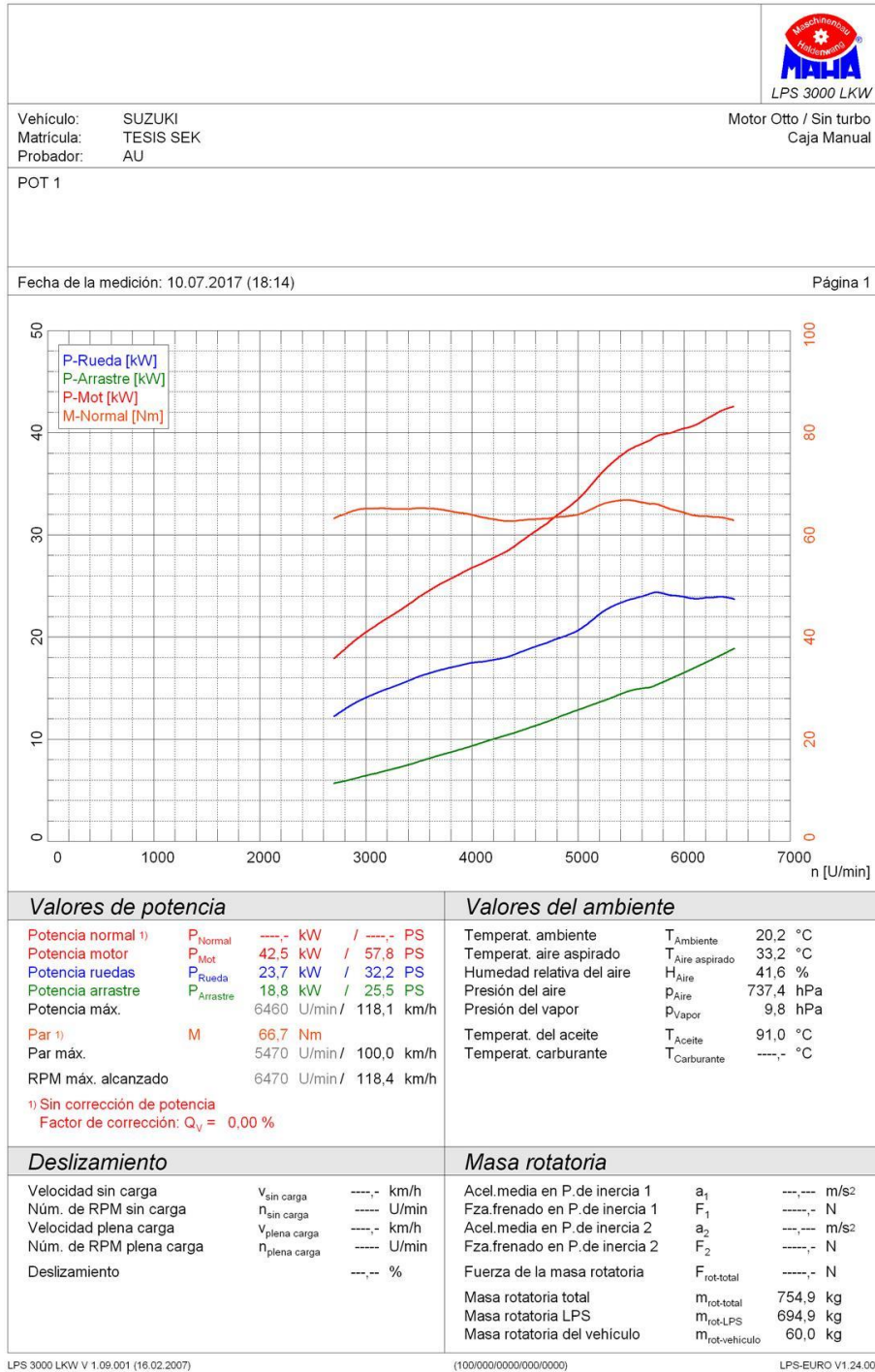
Carga axial	15000 kg
Ancho de vía	1000 mm - 2800 mm
Diámetro mínimo de rueda para prueba	400 mm
Diámetro de rodillo	318 mm
Velocidad de prueba máx.	200 km/h
Potencia de rueda máx.	300 kW
Potencia de neumático máx. (opcional)	660 kW
Fuerza de tracción máx.	15000 N
Precisión de medición Medición de la potencia del neumático (del valor de medición) +/-	2 %
Frenos de corrientes parásitas eléctricos máx. 2 x	150 kW
Fusible gG	63 A
Alimentación de corriente	3/N/PE 400 V 50 Hz
Dimensiones juego de rodillos (La x An x Al)	2260 mm x 1100 mm x 865 mm
Dimensiones del embalaje (La x An x Al)	4700 mm x 1300 mm x 1300 mm
Peso	2500 kg

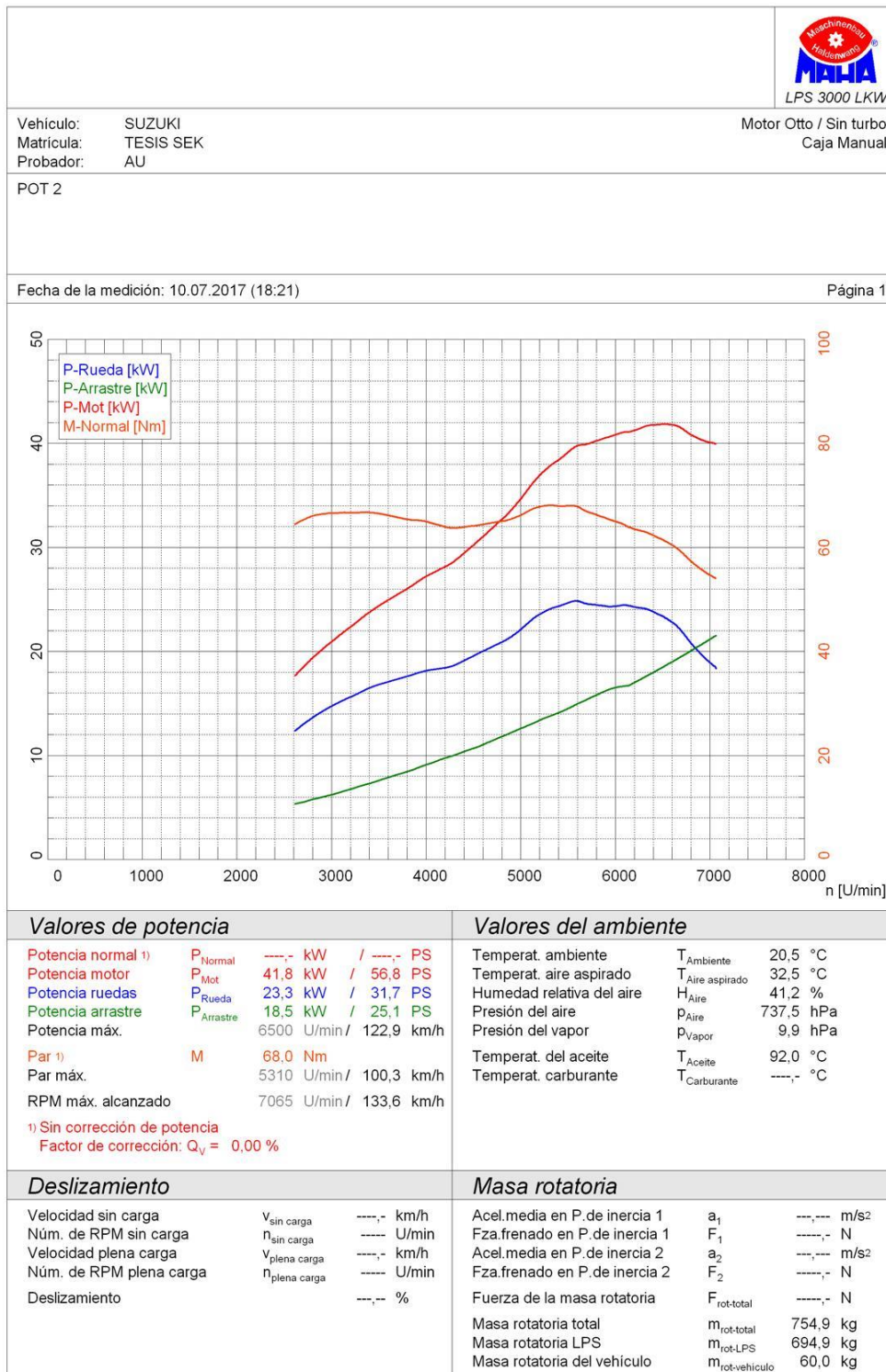
**ACCESORIOS:**

VZ 935181	Rodillos recubiertos a la llama para juego de rodillos R 100/R 200
VZ 935111	Freno de corrientes parásitas reforzado. Potencia máxima sobre rueda 660 kW
VZ 935051	Simulador de carga hidráulico con 2 correas de retención para el juego de rodillos R 200/2
VZ 935102	Dispositivo de anclaje
VZ 930021	Juego de rodillos para pesados con eje gemelo. 1 rodillo puede ser ajustado manualmente
VZ 935054	Ventilador superior con termostato para la refrigeración del freno eléctrico
VZ 975650	Dispositivo de calibración LPS Standard
VZ 975651	Dispositivo de calibración para LPS
VZ 975652	Dispositivo de calibración LPS universal
VM 997404	Conexión y ajuste juegos de rodillos para banco de potencia R 200
VV 997019	Embalaje R 200/2 Europa
VV 997220	Embalaje R 200/2 Ultramar

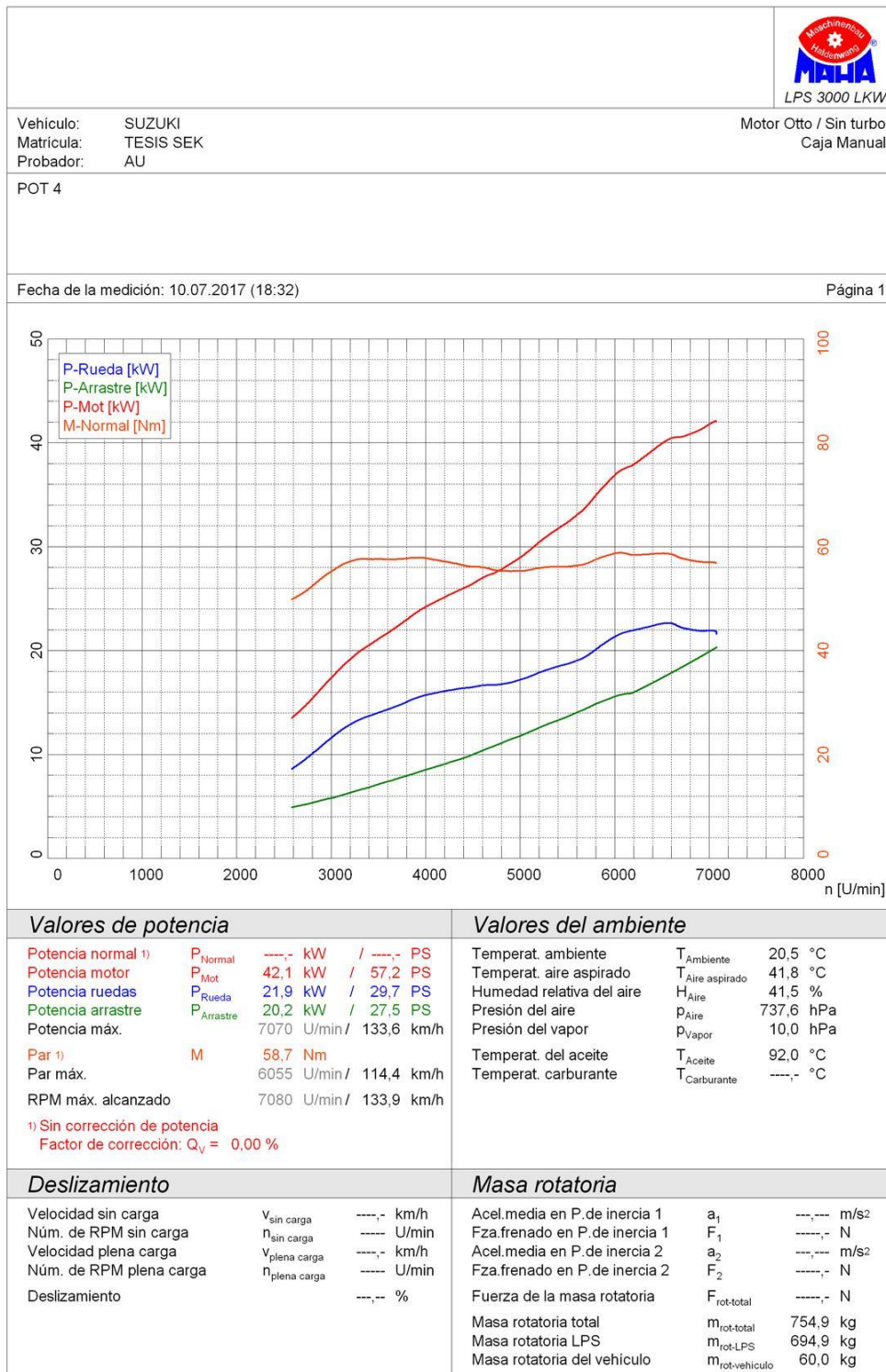
## Anexo 5: Pruebas Dinamométricas

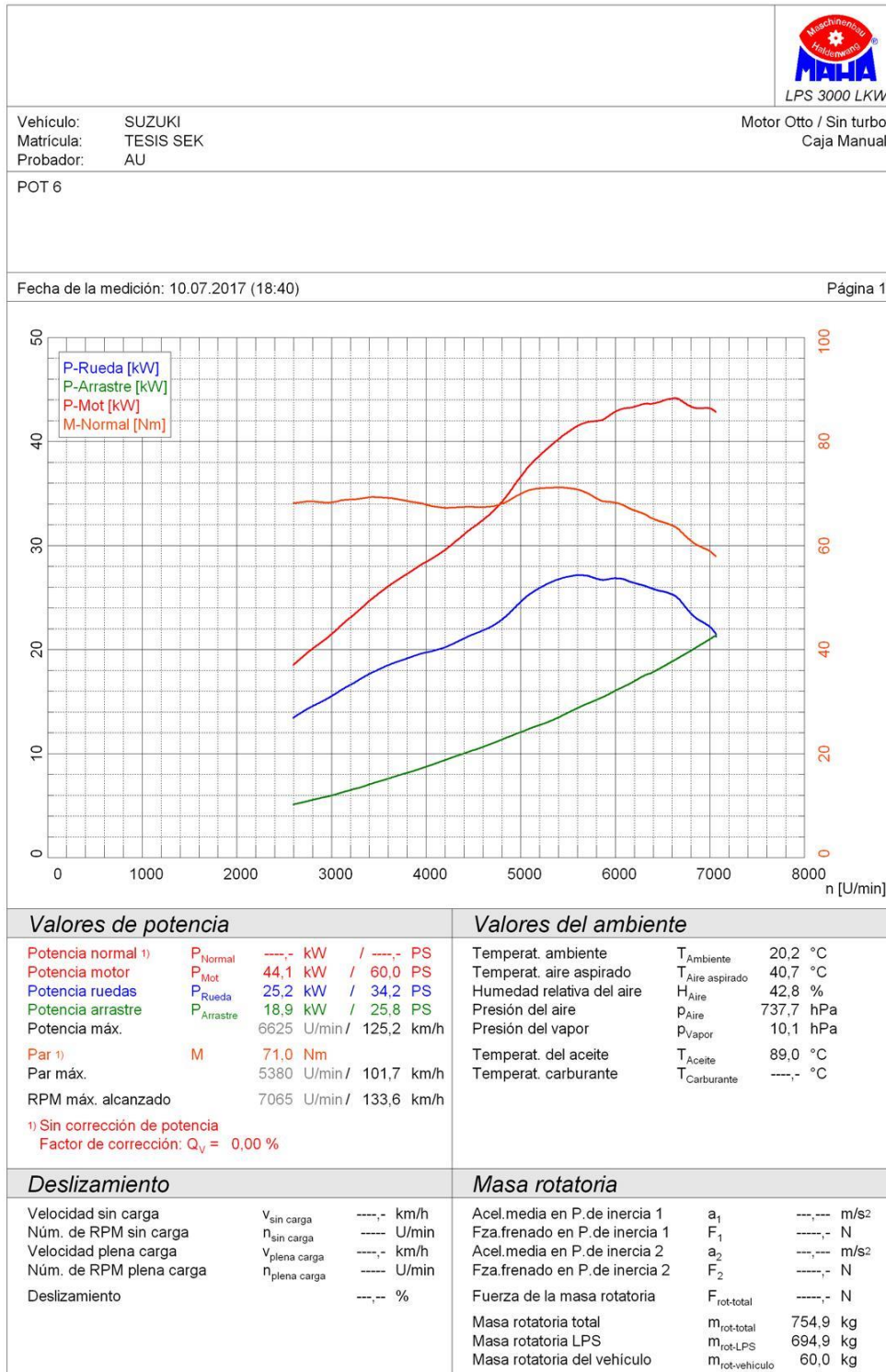
## Múltiple de escape original



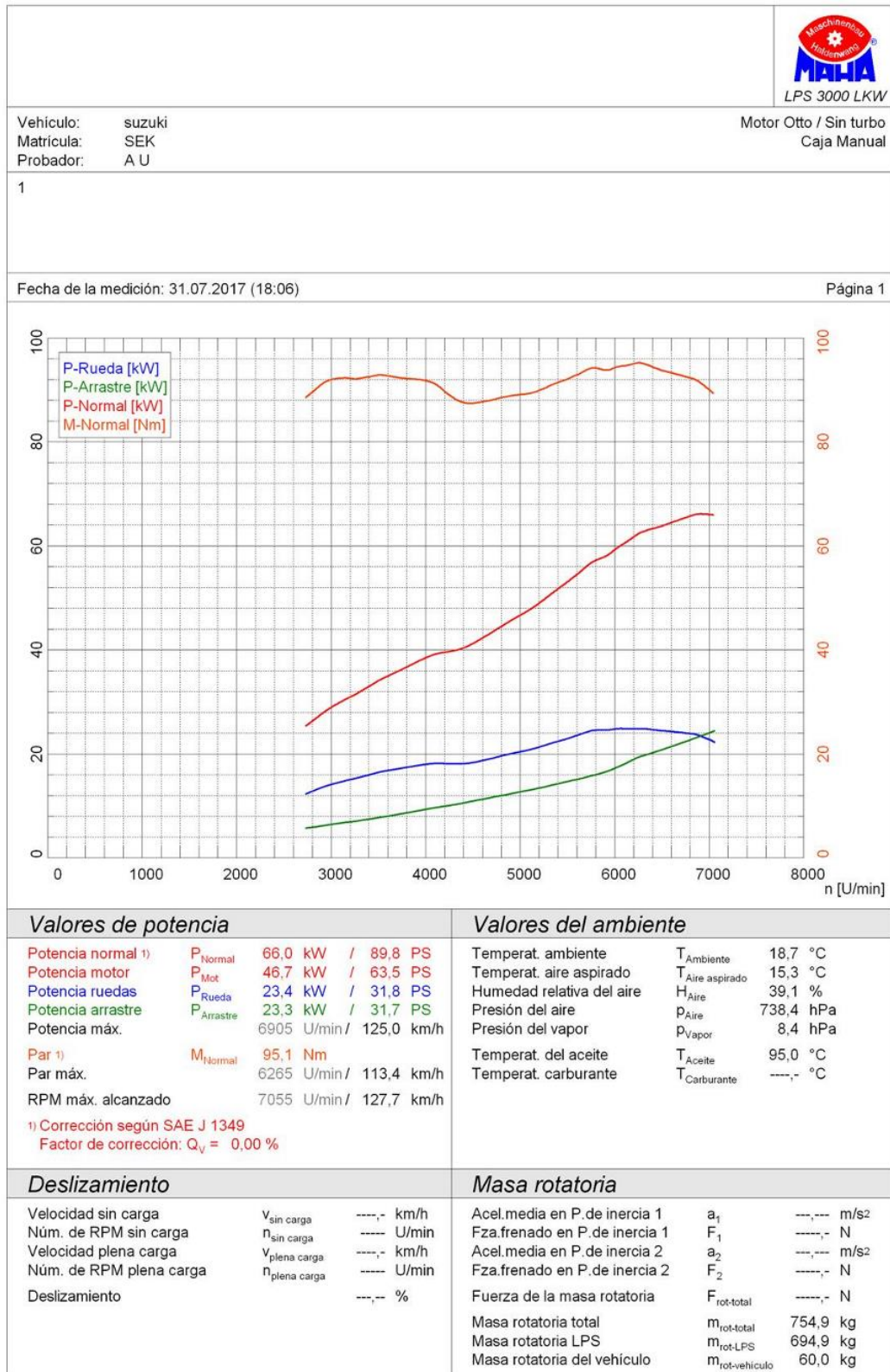


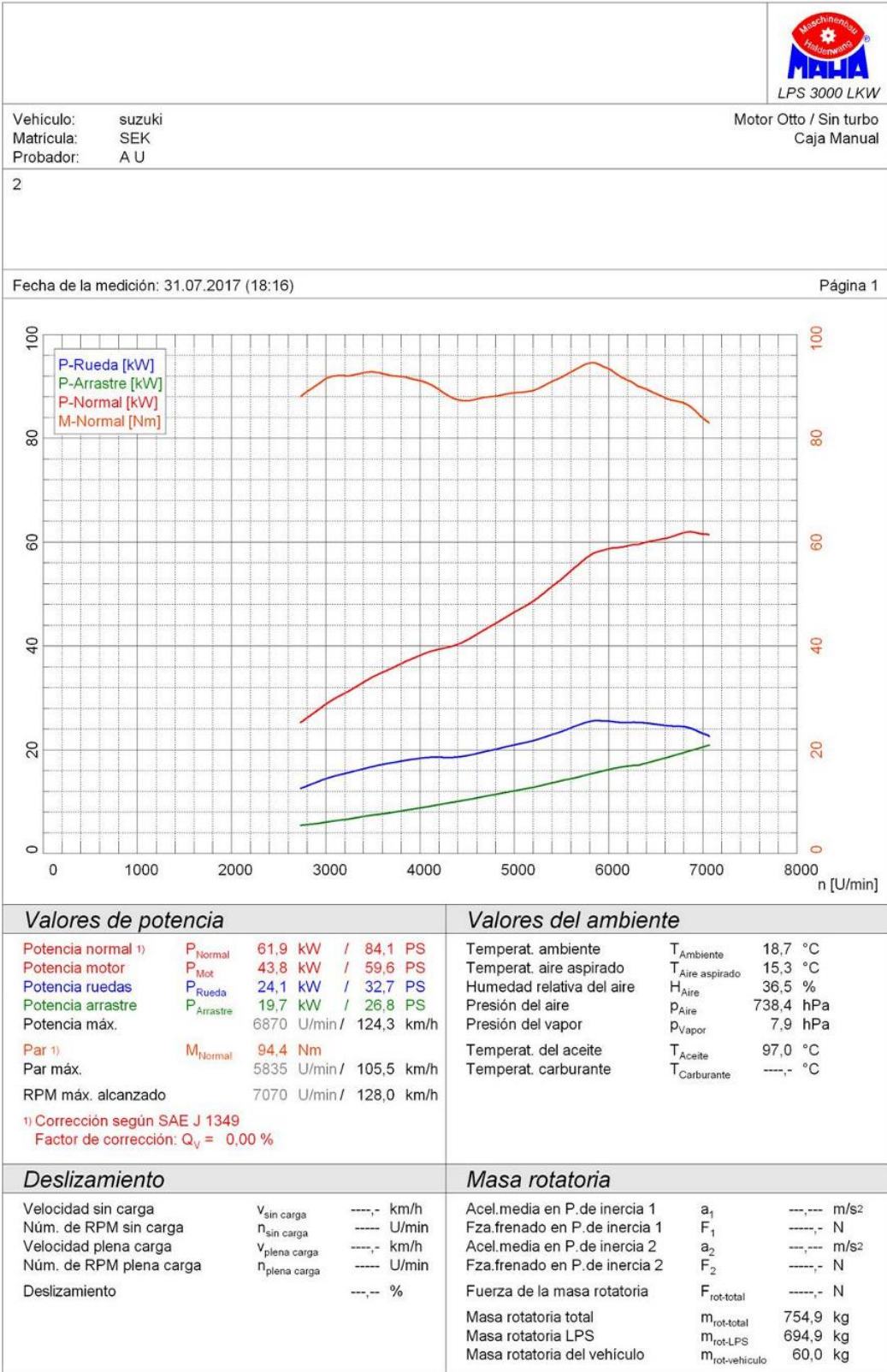


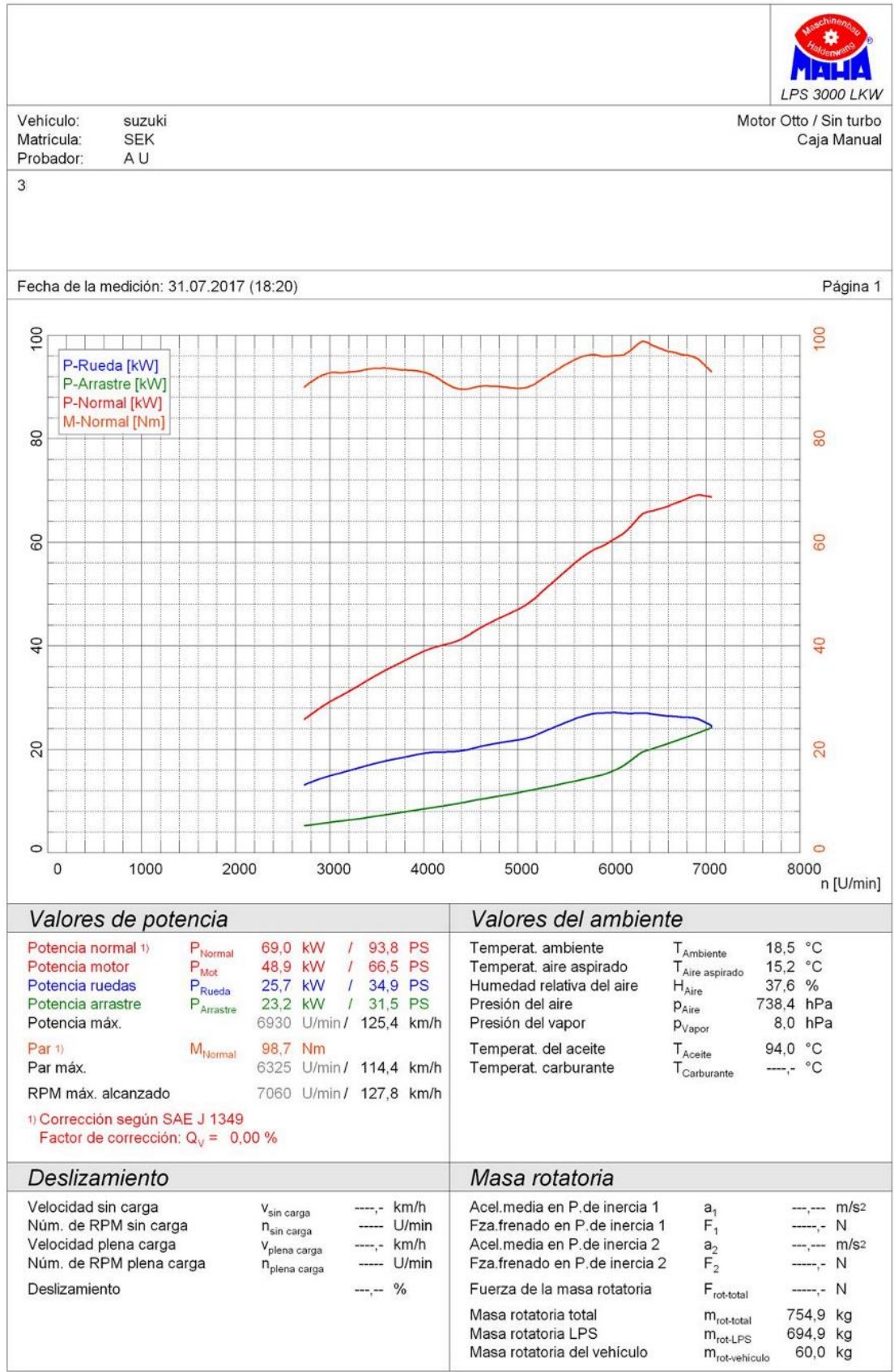


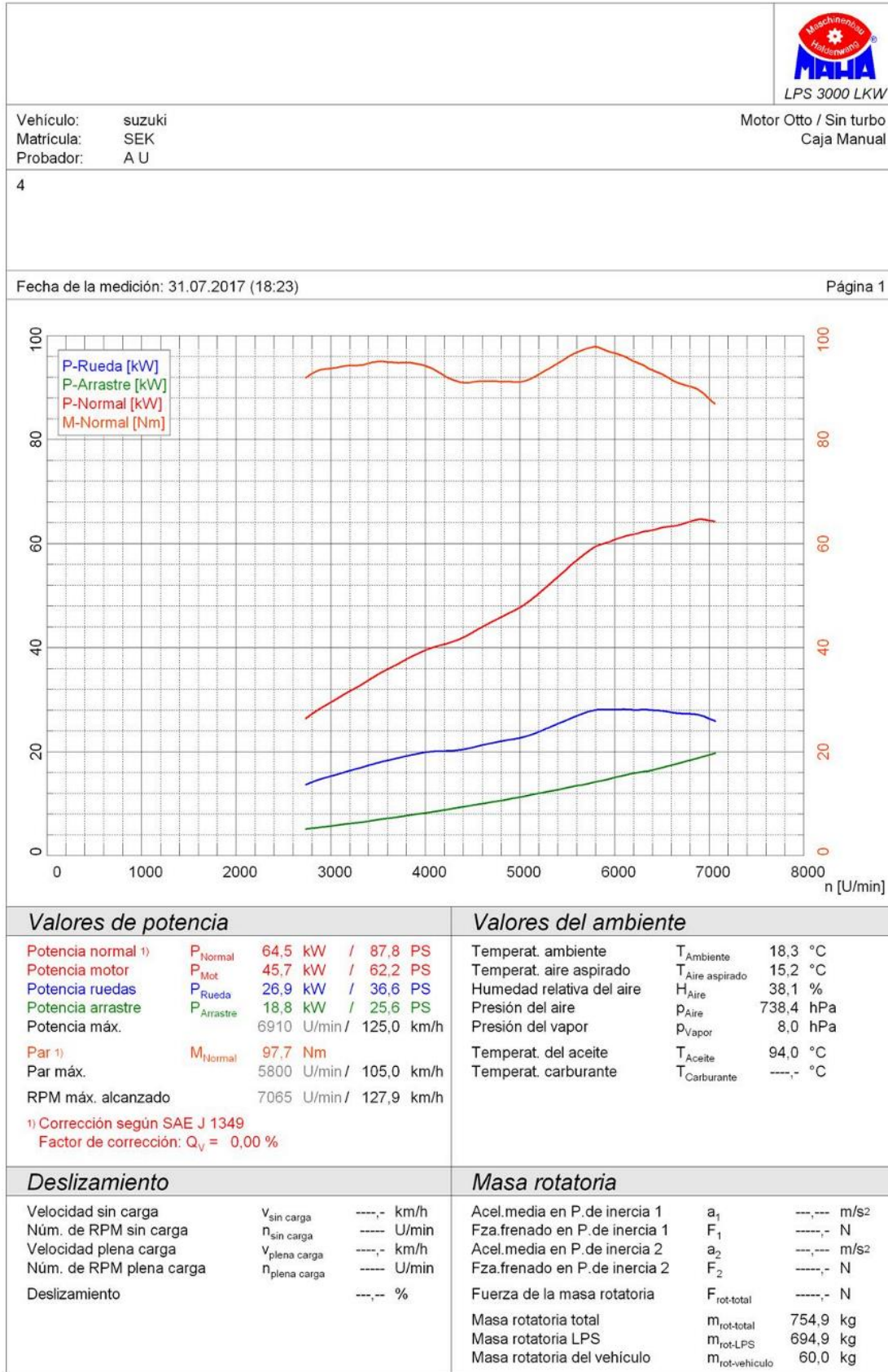


Múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo A.

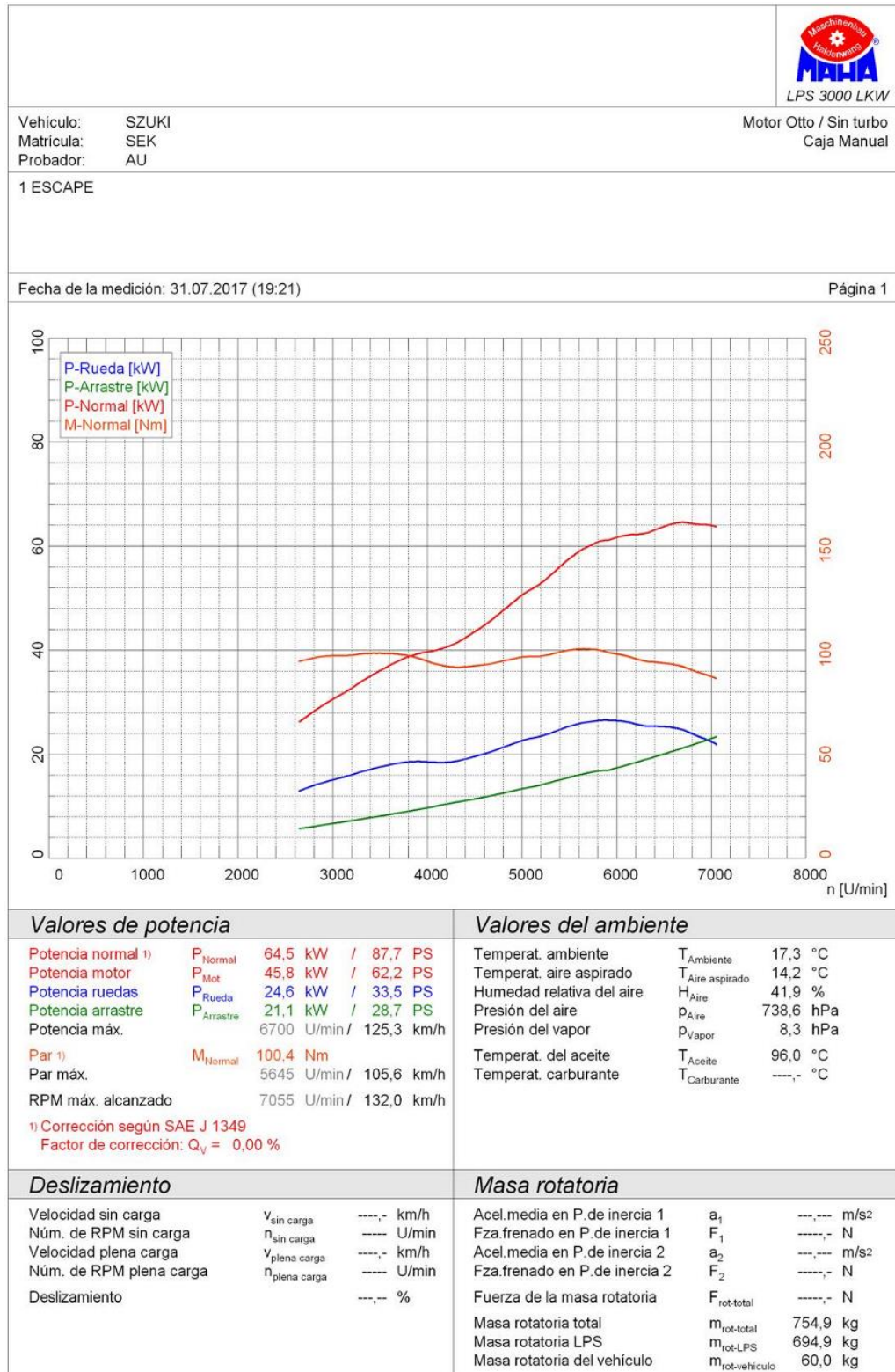


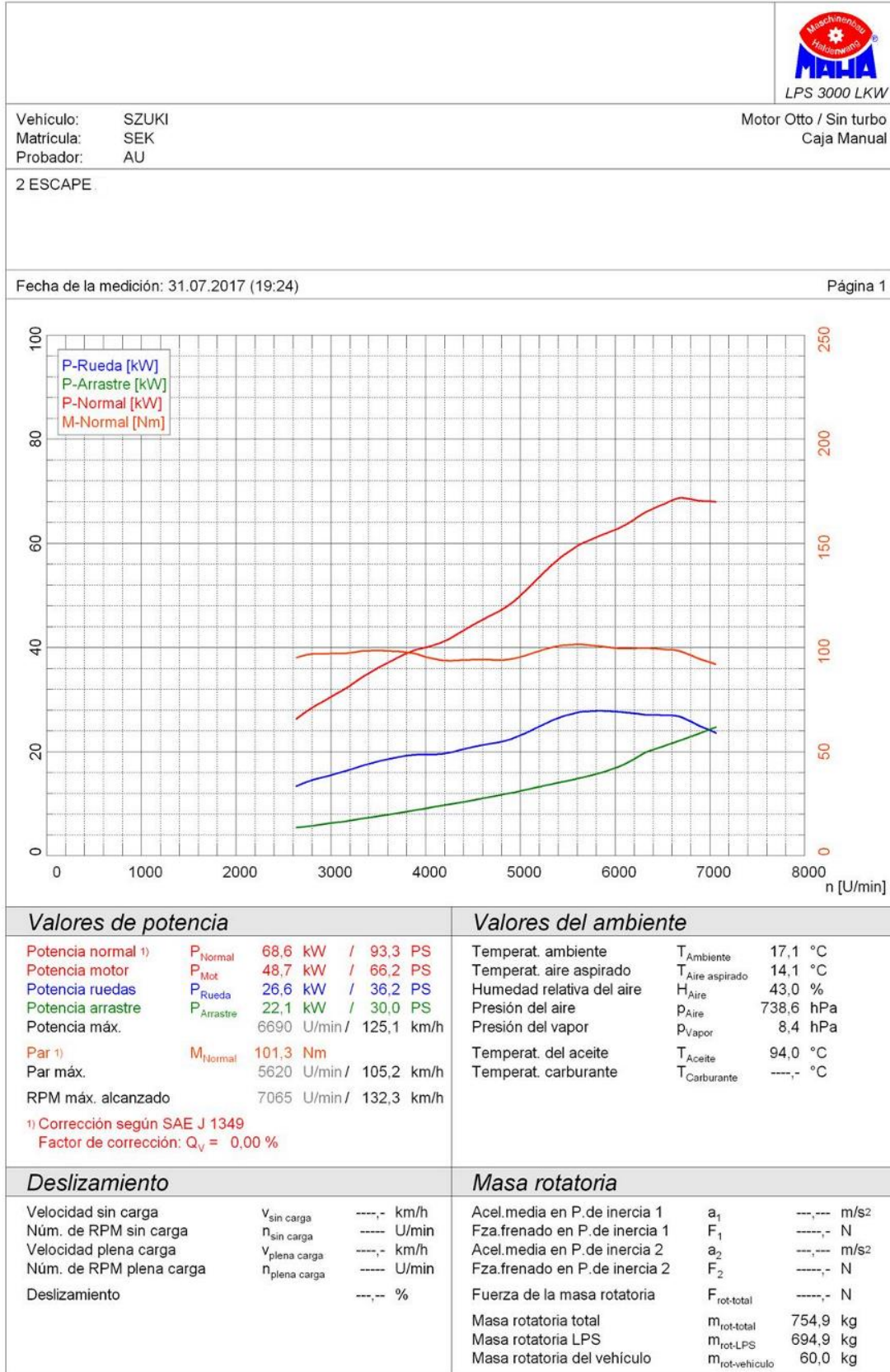




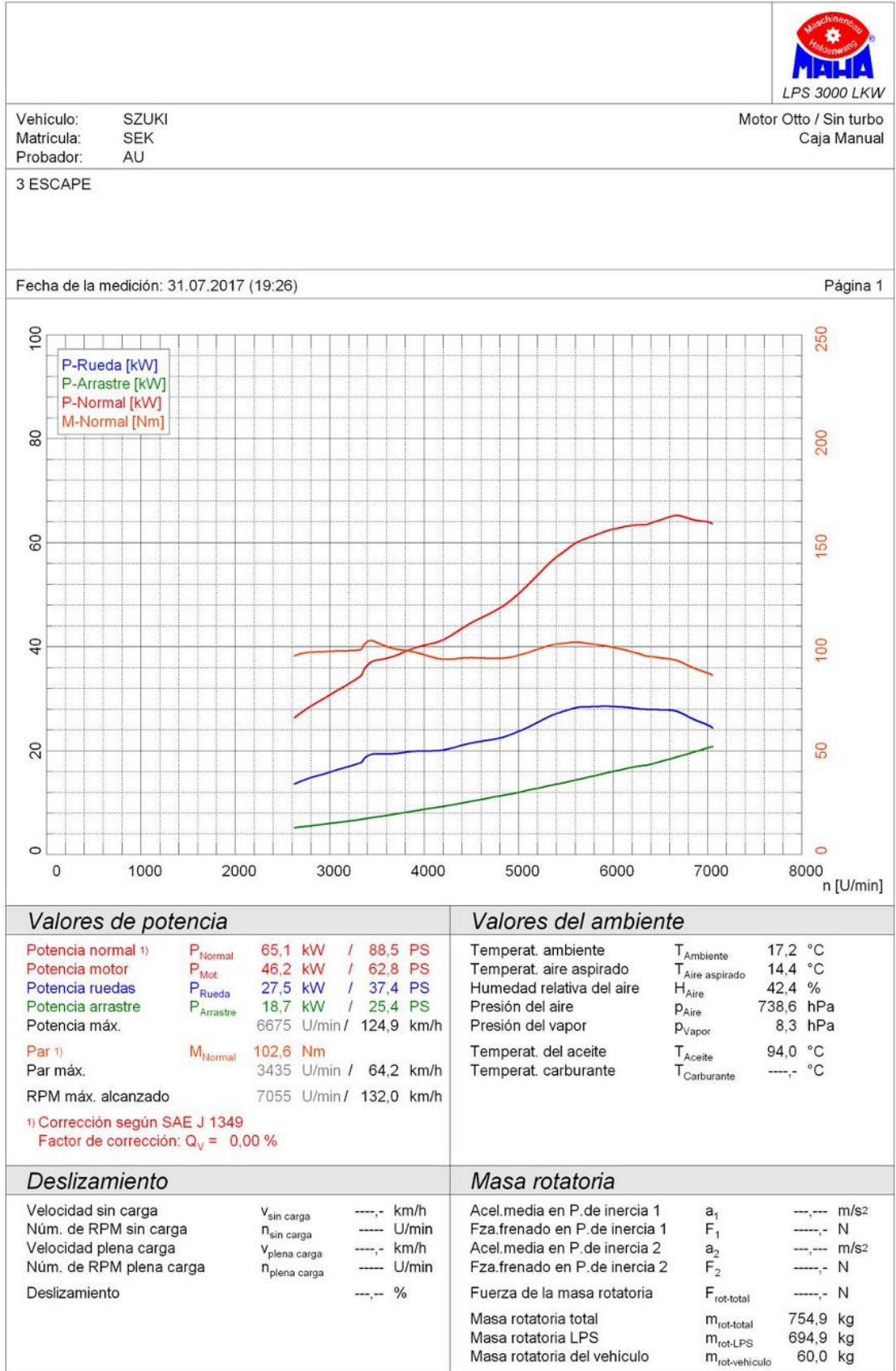

LPS 3000 LKW V 1.09.001 (16.02.2007)
(100/000/0000/000/00000)
LPS-EURO V1.24.001

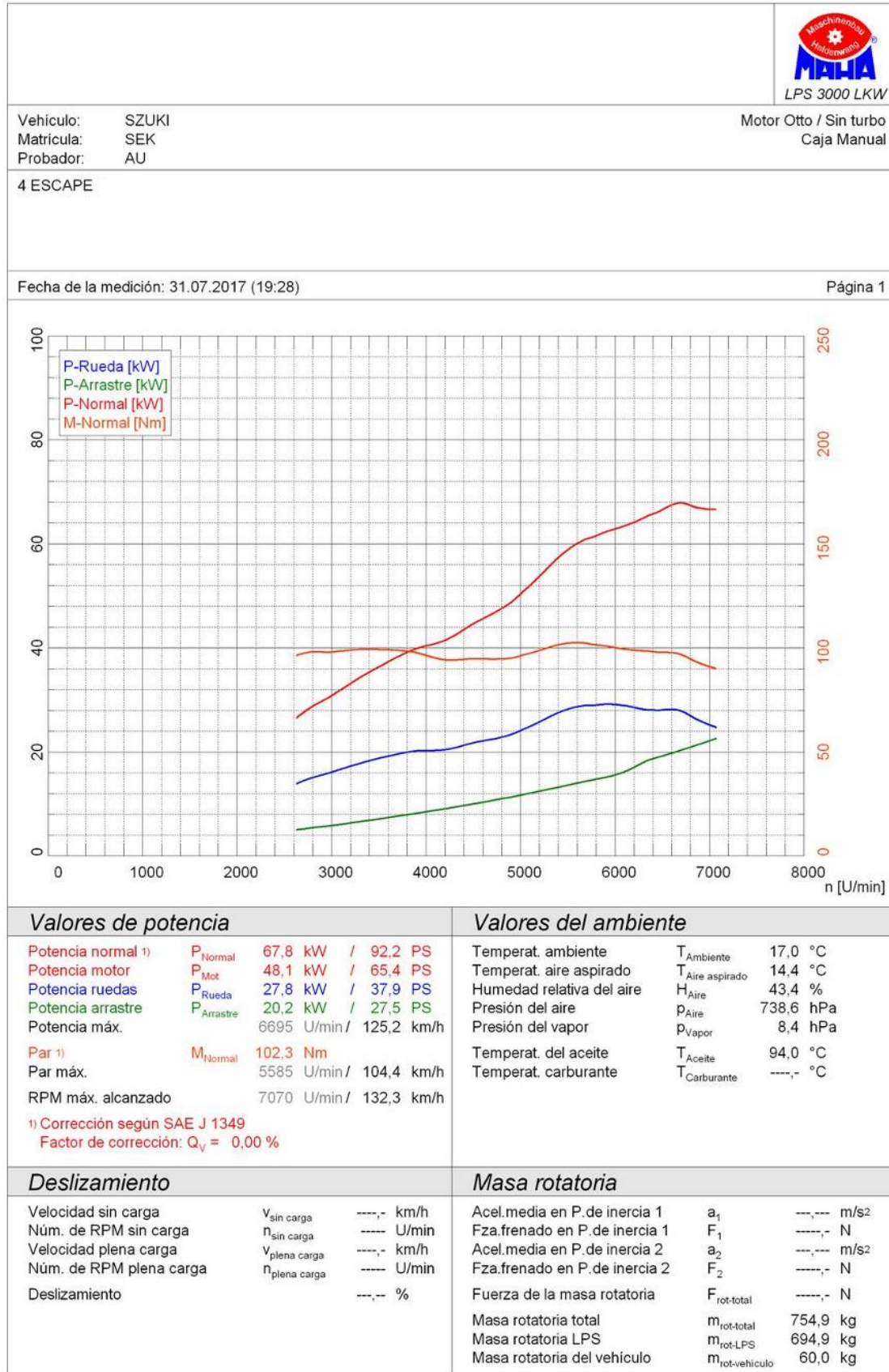
## Múltiple de escape configuración 4-1, construcción tipo B.











## Anexo 6. Reportes de simulaciones en ANSYS

### Múltiple original.

### Análisis estático.

#### 1. File Report

Table 1. File Information for CFX Steady State

Case	CFX Steady State
File Path	D:\MDM\TESIS\3D\MULTIPLE ORIGINAL GTI\ANSYS MO\MO CFX_files\dp0\CFX-1\CFX\CFX Steady State_004.res
File Date	14 julio 2017
File Time	09:32:14
File Type	CFX5
File Version	18.0

#### 2. Mesh Report

Table 2. Mesh Information for CFX Steady State

Domain	Nodes	Elements
Default Domain	74241	384033

#### 3. Physics Report

Table 3. Domain Physics for CFX Steady State

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B180
<i>Materials</i>	
Air Ideal Gas	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Include Viscous Dissipation Term	Off
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

Table 4. Boundary Physics for CFX Steady State

Domain	Boundaries	
Default Domain	<b>Boundary - Ingreso</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso1, Ingreso2, Ingreso3, Ingreso4
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.7300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Total Pressure
	Relative Pressure	1.1800e+00 [bar]
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	<b>Boundary - Salida</b>	
	Type	OUTLET
	Location	Salida
	<i>Settings</i>	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Static Pressure
	Relative Pressure	1.0380e+00 [bar]
	<b>Boundary - Default Domain Default</b>	
	Type	WALL
	Location	F10.180, F100.180, F101.180, F102.180, F103.180, F104.180, F105.180, F106.180, F107.180, F108.180, F109.180, F11.180, F110.180, F111.180, F112.180, F113.180, F114.180, F12.180, F13.180, F14.180, F15.180, F16.180, F17.180, F175.180, F176.180, F18.180, F57.180, F59.180, F6.180, F60.180, F61.180, F62.180, F63.180, F64.180, F65.180, F66.180, F7.180, F8.180, F9.180, F93.180, F94.180, F95.180, F96.180, F97.180, F98.180, F99.180
	<i>Settings</i>	
	Heat Transfer	Adiabatic
Mass And Momentum	No Slip Wall	
Wall Roughness	Smooth Wall	

*Análisi transitorio.***1. File Report****Table 1.** File Information for CFX Transient

<b>Case</b>	CFX Transient
<b>File Path</b>	D:\MDM\TESIS\3D\MULTIPLE ORIGINAL GTI\ANSYS MO\MO CFX_files\dp0\CFX-2\CFX\CFX Transient_001.res
<b>File Date</b>	19 julio 2017
<b>File Time</b>	12:30:05
<b>File Type</b>	CFX5
<b>File Version</b>	18.0

**2. Mesh Report****Table 2.** Mesh Information for CFX Steady State

Domain	Nodes	Elements
Default Domain	74241	384033

**3. Physics Report****Table 3.** Domain Physics for CFX Transient

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B180
<i>Materials</i>	
Air Ideal Gas	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

**Table 4.** Boundary Physics for CFX Transient

Domain	Boundaries	
Default Domain	<b>Boundary - Ingreso1</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso1
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.9300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Mass Flow Rate
	Mass Flow Rate	Ing 1
	Mass Flow Rate Area	As Specified
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio

<b>Boundary - Ingreso2</b>	
Type	INLET
Location	Ingreso2
<i>Settings</i>	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Heat Transfer	Static Temperature
Static Temperature	9.9300e+02 [K]
Mass And Momentum	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	Ing 2
Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
<b>Boundary - Ingreso3</b>	
Type	INLET
Location	Ingreso3
<i>Settings</i>	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Heat Transfer	Static Temperature
Static Temperature	9.9300e+02 [K]
Mass And Momentum	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	Ing 3
Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
<b>Boundary - Ingreso4</b>	
Type	INLET
Location	Ingreso4
<i>Settings</i>	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Heat Transfer	Static Temperature
Static Temperature	9.9300e+02 [K]
Mass And Momentum	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	Ing 4
Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
<b>Boundary - Salida</b>	
Type	OUTLET
Location	Salida
<i>Settings</i>	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Static Pressure
Relative Pressure	1.0380e+00 [bar]
<b>Boundary - Default Domain Default</b>	
Type	WALL
Location	F10.180, F100.180, F101.180, F102.180, F103.180, F104.180, F105.180, F106.180, F107.180, F108.180, F109.180, F11.180, F110.180, F111.180, F112.180, F113.180, F114.180, F12.180, F13.180, F14.180, F15.180, F16.180, F17.180, F175.180, F176.180, F18.180, F57.180, F59.180, F6.180, F60.180, F61.180, F62.180, F63.180, F64.180, F65.180, F66.180, F7.180, F8.180, F9.180, F93.180, F94.180, F95.180, F96.180, F97.180, F98.180, F99.180
<i>Settings</i>	
Heat Transfer	Adiabatic
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Smooth Wall

## Múltiple configuración 4-1.

### Análisis estático.

#### 1. File Report

Table 1. File Information for CFX Steady State

Case	CFX Steady State
File Path	D:\MDM\TESIS\3D\MULTIPLE 4-1\ANSYS 4-1\4-1 CFX_files\dp0\CFX\CFX Steady State_001.res
File Date	19 julio 2017
File Time	11:12:03
File Type	CFX5
File Version	18.0

#### 2. Mesh Report

Table 2. Mesh Information for CFX Steady State

Domain	Nodes	Elements
Default Domain	90628	459909

#### 3. Physics Report

Table 3. Domain Physics for CFX Steady State

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	8328
<i>Materials</i>	
Air Ideal Gas	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

Table 4. Boundary Physics for CFX Steady State

Domain	Boundaries	
Default Domain	<b>Boundary - Ingreso</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso1, Ingreso2, Ingreso3, Ingreso4
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.7300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Total Pressure
	Relative Pressure	1.1800e+00 [bar]
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	<b>Boundary - Salida</b>	
	Type	OUTLET
	Location	Salida
	<i>Settings</i>	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Static Pressure
	Relative Pressure	1.0380e+00 [bar]
	<b>Boundary - Default Domain Default</b>	
	Type	WALL
Location	F10.328, F11.328, F12.328, F13.328, F14.328, F15.328, F16.328, F17.328, F18.328, F19.328, F20.328, F21.328, F22.328, F23.328, F24.328, F25.328, F27.328, F28.328, F29.328, F30.328, F31.328, F32.328, F34.328, F35.328, F36.328, F37.328, F38.328, F39.328, F40.328, F41.328, F42.328, F43.328, F44.328, F45.328, F46.328, F47.328, F48.328, F49.328, F50.328, F51.328, F53.328, F54.328, F55.328, F56.328, F58.328, F59.328, F61.328, F62.328, F63.328, F64.328, F65.328, F66.328, F67.328, F68.328, F69.328, F70.328, F71.328, F72.328, F73.328, F74.328, F75.328, F76.328, F77.328, F78.328, F79.328, F80.328, F82.328, F83.328, F84.328, F85.328, F86.328, F87.328, F88.328, F89.328, F9.328, F90.328, F92.328, F93.328, F94.328, F95.328, F96.328, F97.328	
<i>Settings</i>		
Heat Transfer	Adiabatic	
Mass And Momentum	No Slip Wall	
Wall Roughness	Smooth Wall	

*Análisis transitorio.***1. File Report****Table 1.** File Information for CFX Transient

<b>Case</b>	CFX Transient
<b>File Path</b>	D:\MDM\TESIS\3D\MULTIPLE 4-1\ANSYS 4-1\4-1 CFX_files\dp0\CFX-1\CFX\CFX Transient_001.res
<b>File Date</b>	20 julio 2017
<b>File Time</b>	08:12:32
<b>File Type</b>	CFX5
<b>File Version</b>	18.0

**2. Mesh Report****Table 2.** Mesh Information for CFX Steady State

Domain	Nodes	Elements
Default Domain	90628	459909

**3. Physics Report****Table 3.** Domain Physics for CFX Transient

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B328
<i>Materials</i>	
Air Ideal Gas	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

**Table 4.** Boundary Physics for CFX Transient

Domain	Boundaries	
Default Domain	<b>Boundary - Ingreso1</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso1
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.7300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Mass Flow Rate
	Mass Flow Rate	Ing 1
	Mass Flow Rate Area	As Specified
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	<b>Boundary - Ingreso2</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso2
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.7300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Mass Flow Rate
	Mass Flow Rate	Ing 2
	Mass Flow Rate Area	As Specified
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio

<b>Boundary - Ingreso3</b>	
Type	INLET
Location	Ingreso3
<i>Settings</i>	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Heat Transfer	Static Temperature
Static Temperature	9.7300e+02 [K]
Mass And Momentum	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	Ing 3
Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
<b>Boundary - Ingreso4</b>	
Type	INLET
Location	Ingreso4
<i>Settings</i>	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Heat Transfer	Static Temperature
Static Temperature	9.7300e+02 [K]
Mass And Momentum	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	Ing 4
Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio

<b>Boundary - Salida</b>	
Type	OUTLET
Location	Salida
<i>Settings</i>	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Static Pressure
Relative Pressure	1.0380e+00 [bar]
<b>Boundary - Default Domain Default</b>	
Type	WALL
Location	F10.328, F11.328, F12.328, F13.328, F14.328, F15.328, F16.328, F17.328, F18.328, F19.328, F20.328, F21.328, F22.328, F23.328, F24.328, F25.328, F27.328, F28.328, F29.328, F30.328, F31.328, F32.328, F34.328, F35.328, F36.328, F37.328, F38.328, F39.328, F40.328, F41.328, F42.328, F43.328, F44.328, F45.328, F46.328, F47.328, F48.328, F49.328, F50.328, F51.328, F53.328, F54.328, F55.328, F56.328, F58.328, F59.328, F61.328, F62.328, F63.328, F64.328, F65.328, F66.328, F67.328, F68.328, F69.328, F70.328, F71.328, F72.328, F73.328, F74.328, F75.328, F76.328, F77.328, F78.328, F79.328, F80.328, F82.328, F83.328, F84.328, F85.328, F86.328, F87.328, F88.328, F89.328, F9.328, F90.328, F92.328, F93.328, F94.328, F95.328, F96.328, F97.328
<i>Settings</i>	
Heat Transfer	Adiabatic
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Smooth Wall



## Múltiple configuración 4-2-1.

### Análisis estático.

#### 1. File Report

Table 1. File Information for CFX Steady State

Case	CFX Steady State
File Path	D:\MDM\TESIS\3D\MULTIPLE 4-2-1\ANSYS 4-2-1\4-2-1 CFX_files\dp0\CFX\CFX Steady State_001.res
File Date	20 Julio 2017
File Time	04:27:49
File Type	CFX5
File Version	18.0

#### 2. Mesh Report

Table 2. Mesh Information for CFX Steady State

Domain	Nodes	Elements
Default Domain	40760	200327

#### 3. Physics Report

Table 3. Domain Physics for CFX Steady State

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B452
<i>Materials</i>	
Air Ideal Gas	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

Table 4. Boundary Physics for CFX Steady State

Domain	Boundaries	
Default Domain	<b>Boundary - Ingreso</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso1, Ingreso2, Ingreso4, Ingreso3
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.7300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Total Pressure
	Relative Pressure	1.1800e+00 [bar]
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	<b>Boundary - Salida</b>	
	Type	OUTLET
	Location	Salida
	<i>Settings</i>	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Static Pressure
	Relative Pressure	1.0380e+00 [bar]
	<b>Boundary - Default Domain Default</b>	
	Type	WALL
	Location	F10.452, F100.452, F101.452, F102.452, F103.452, F104.452, F105.452, F106.452, F107.452, F108.452, F109.452, F110.452, F111.452, F112.452, F113.452, F114.452, F115.452, F116.452, F117.452, F118.452, F119.452, F120.452, F22.452, F23.452, F24.452, F25.452, F26.452, F27.452, F28.452, F29.452, F30.452, F31.452, F32.452, F33.452, F34.452, F35.452, F36.452, F38.452, F39.452, F40.452, F41.452, F42.452, F43.452, F44.452, F45.452, F46.452, F47.452, F48.452, F49.452, F50.452, F51.452, F52.452, F53.452, F54.452, F55.452, F56.452, F57.452, F58.452, F59.452, F60.452, F61.452, F62.452, F63.452, F64.452, F65.452, F66.452, F67.452, F68.452, F69.452, F70.452, F71.452, F72.452, F73.452, F74.452, F75.452, F76.452, F77.452, F78.452, F80.452, F81.452, F82.452, F83.452, F84.452, F85.452, F86.452, F87.452, F89.452, F9.452, F90.452, F91.452, F92.452, F95.452, F96.452, F97.452, F98.452, F99.452
	<i>Settings</i>	
	Heat Transfer	Adiabatic
Mass And Momentum	No Slip Wall	
Wall Roughness	Smooth Wall	

*Análisis transitorio.***1. File Report****Table 1.** File Information for CFX Transient

<b>Case</b>	CFX Transient
<b>File Path</b>	D:\MDM\TESIS\3D\MULTIPLE 4-2-1\ANSYS 4-2-1\4-2-1 CFX_files\dp0\CFX-1\CFX\CFX Transient_001.res
<b>File Date</b>	20 julio 2017
<b>File Time</b>	06:25:15
<b>File Type</b>	CFX5
<b>File Version</b>	18.0

**2. Mesh Report****Table 2.** Mesh Information for CFX Transient

Domain	Nodes	Elements
Default Domain	40760	200327

**3. Physics Report****Table 3.** Domain Physics for CFX Transient

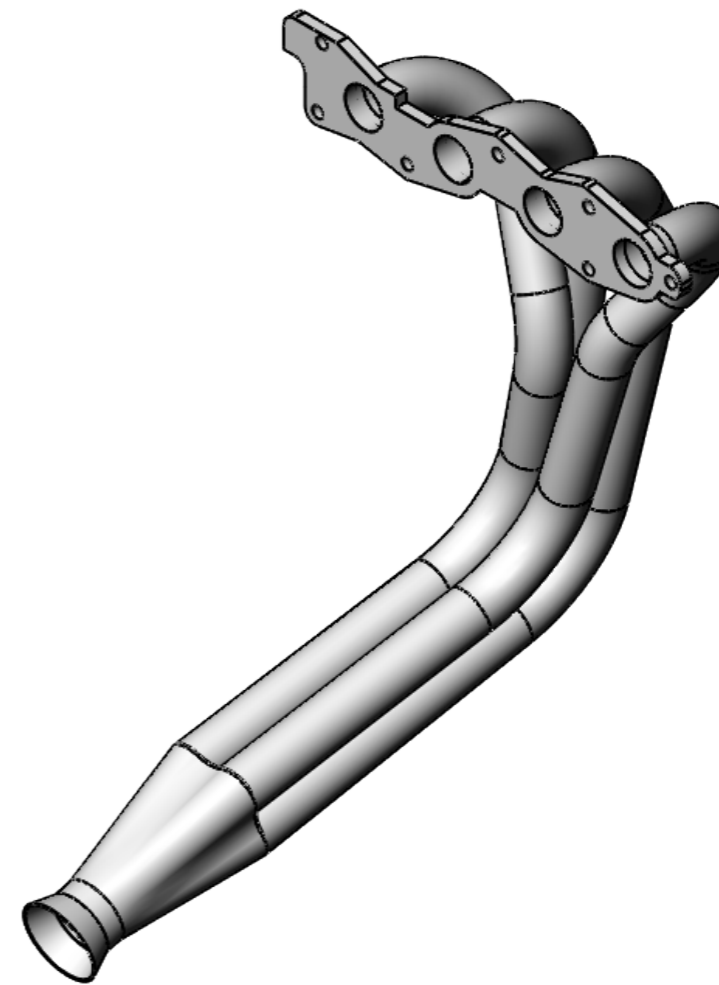
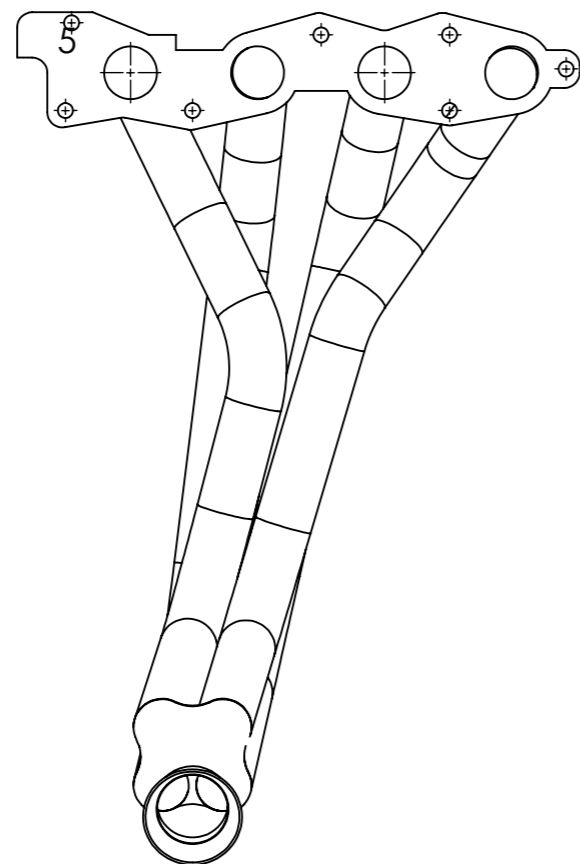
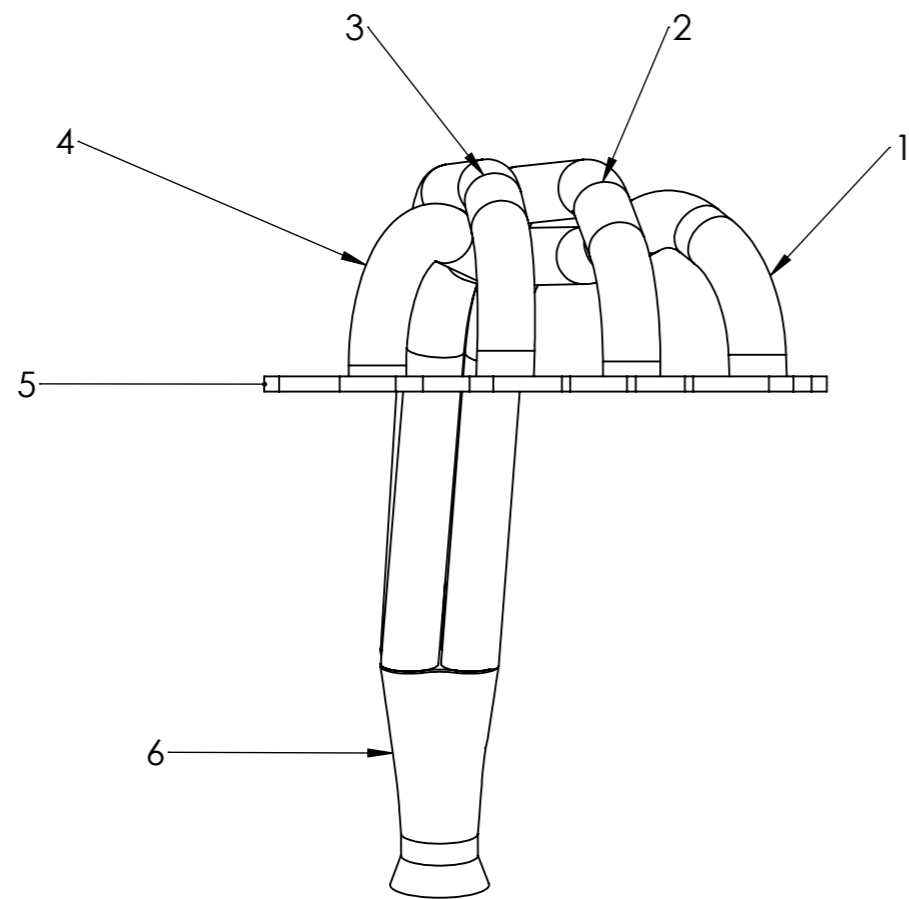
Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B452
<i>Materials</i>	
Air Ideal Gas	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

**Table 4.** Boundary Physics for CFX Transient

Domain	Boundaries	
Default Domain	<b>Boundary - Ingreso1</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso1
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.7300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Mass Flow Rate
	Mass Flow Rate	Ing 1
	Mass Flow Rate Area	As Specified
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	<b>Boundary - Ingreso2</b>	
	Type	INLET
	Location	Ingreso2
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	9.7300e+02 [K]
	Mass And Momentum	Mass Flow Rate
	Mass Flow Rate	Ing 2
	Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio	

<b>Boundary - Ingreso3</b>	
Type	INLET
Location	Ingreso3
<i>Settings</i>	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Heat Transfer	Static Temperature
Static Temperature	9.7300e+02 [K]
Mass And Momentum	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	Ing 3
Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
<b>Boundary - Ingreso4</b>	
Type	INLET
Location	Ingreso4
<i>Settings</i>	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Heat Transfer	Static Temperature
Static Temperature	9.7300e+02 [K]
Mass And Momentum	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	Ing 4
Mass Flow Rate Area	As Specified
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
<b>Boundary - Salida</b>	
Type	OUTLET
Location	Salida
<i>Settings</i>	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Static Pressure
Relative Pressure	1.0380e+00 [bar]
<b>Boundary - Default Domain Default</b>	
Type	WALL
Location	F10.452, F100.452, F101.452, F102.452, F103.452, F104.452, F105.452, F106.452, F107.452, F108.452, F109.452, F11.452, F110.452, F111.452, F112.452, F113.452, F114.452, F12.452, F13.452, F14.452, F15.452, F17.452, F18.452, F19.452, F20.452, F22.452, F23.452, F24.452, F25.452, F26.452, F27.452, F28.452, F29.452, F30.452, F31.452, F32.452, F33.452, F34.452, F35.452, F36.452, F38.452, F39.452, F40.452, F41.452, F42.452, F43.452, F44.452, F45.452, F46.452, F47.452, F48.452, F49.452, F50.452, F51.452, F52.452, F53.452, F54.452, F55.452, F56.452, F57.452, F58.452, F59.452, F60.452, F61.452, F62.452, F63.452, F64.452, F65.452, F66.452, F67.452, F68.452, F69.452, F70.452, F71.452, F72.452, F73.452, F74.452, F75.452, F76.452, F77.452, F78.452, F80.452, F81.452, F82.452, F83.452, F84.452, F85.452, F86.452, F87.452, F89.452, F9.452, F90.452, F91.452, F92.452, F95.452, F96.452, F97.452, F98.452, F99.452
<i>Settings</i>	
Heat Transfer	Adiabatic
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Smooth Wall

**Anexo 7. Planos de construcción múltiple de escape 4-1**



6		Colector	011	1	ASTM A500	-
5		Placa de sujeción	010	1	ASTM A500	-
4		Tubo cilindro 4	008	1	ASTM A500	-
3		Tubo cilindro 3	006	1	ASTM A500	-
2		Tubo cilindro 2	004	1	ASTM A500	-
1		Tubo cilindro 1	002	1	ASTM A500	-
Nº	Zona	Denominación	Plano	Can.	Material	Observaciones

**UISEK**

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO  
MENCION AUTOPARTES

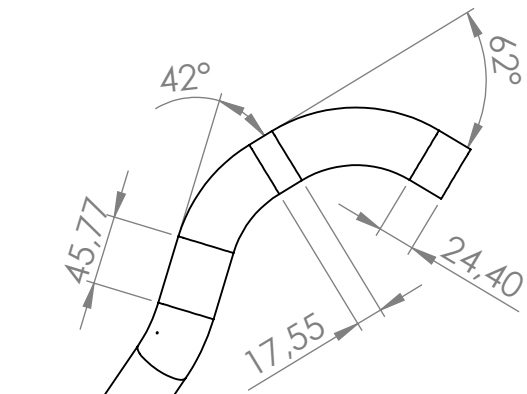
DIB. Ing. Edwin S. Arroyo T.  
DIS. Ing. Edwin S. Arroyo T.  
REV. Ing. Juan C. Rocha H.

Escala:  
1 : 5

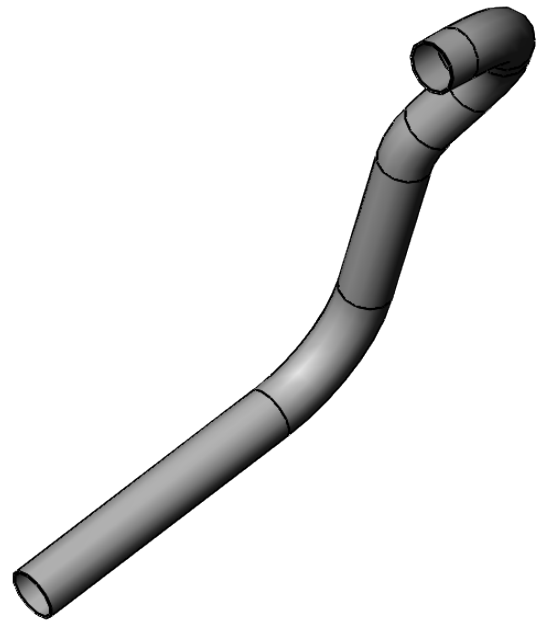
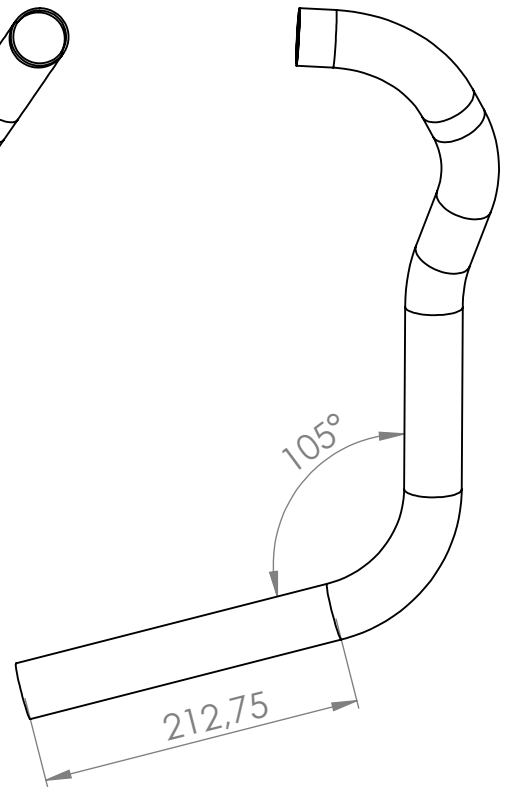
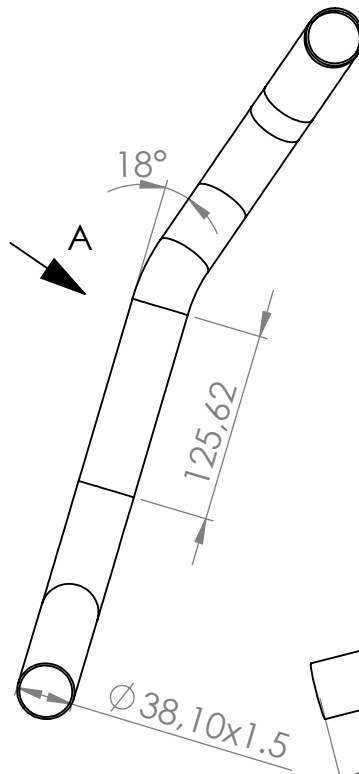
MÚLTIPLE DE ESCAPE 4-1

001

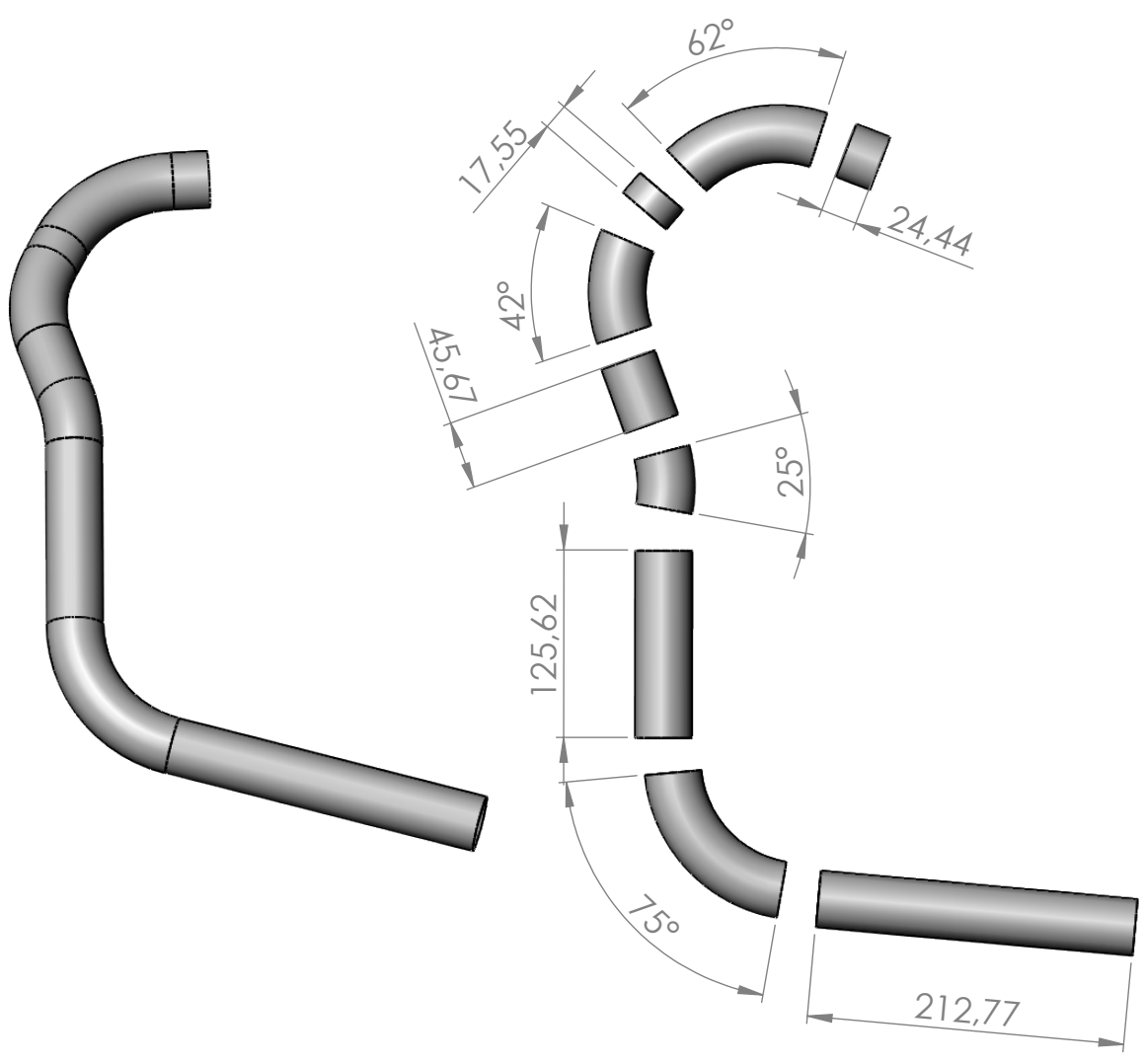
Fecha:  
2017/07/21



VISTA A



Trat. Térmico:	Ninguno	<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES				
Recubrimiento:	Pintura alta temper.		DIB.	Edwin S. Arroyo T.			
Material:	ASTM A500	Tol. Gral:	± 0.05	Escala:	1 : 5	DIS.	Edwin S. Arroyo T.
				REV.	Juan Carlos Rocha H.		
TUBO CILINDRO 1				002	Fecha	2017/07/21	



Trat. Térmico:	Ninguno	<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES				
Recubrimiento:	Pintura alta temper.		DIB.	Edwin S. Arroyo T.			
Material:	ASTM A500	Tol. Gral:	± 0.05	Escala:	1 : 5	DIS.	Edwin S. Arroyo T.
				REV.	Juan Carlos Rocha H.		
<b>SECCIONAMIENTO TUBO CILINDRO 1</b>				003		Fecha 2017/07/21	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

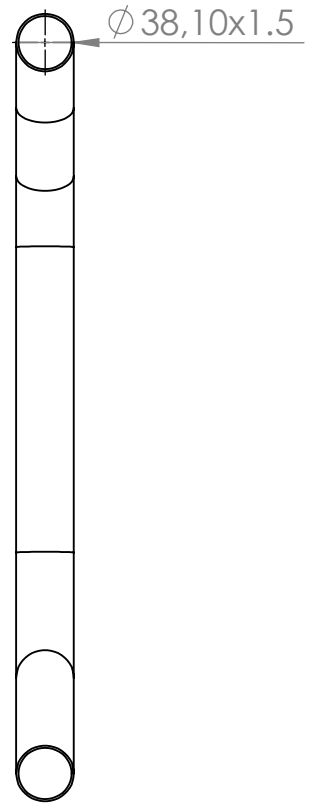
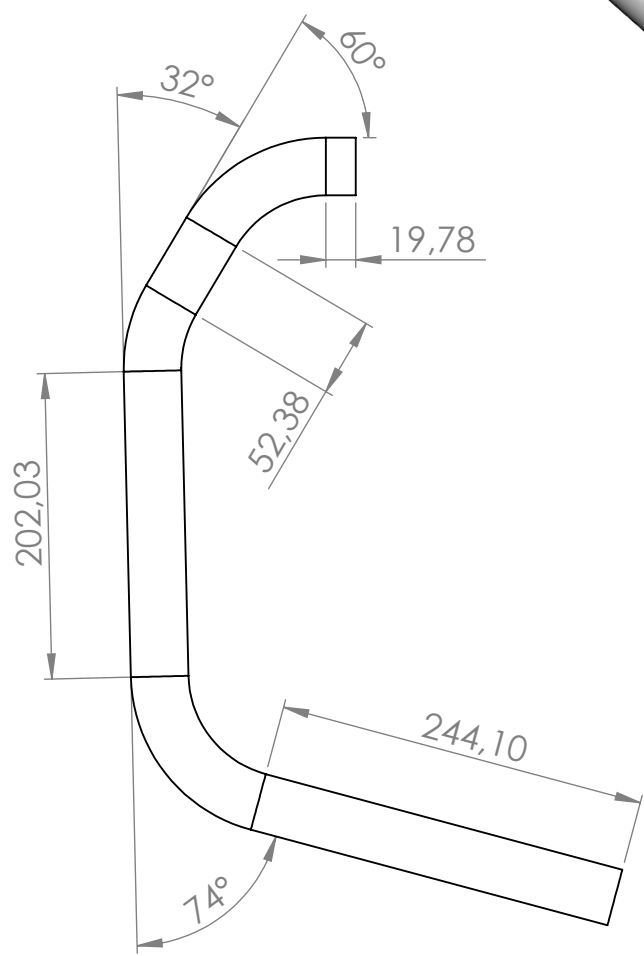
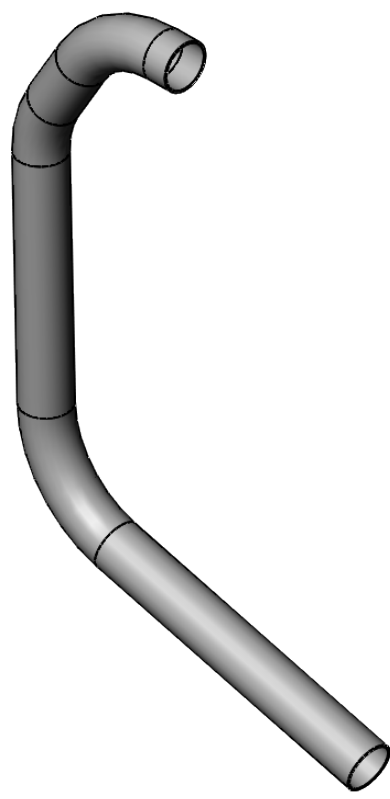
D

C

C

B

B



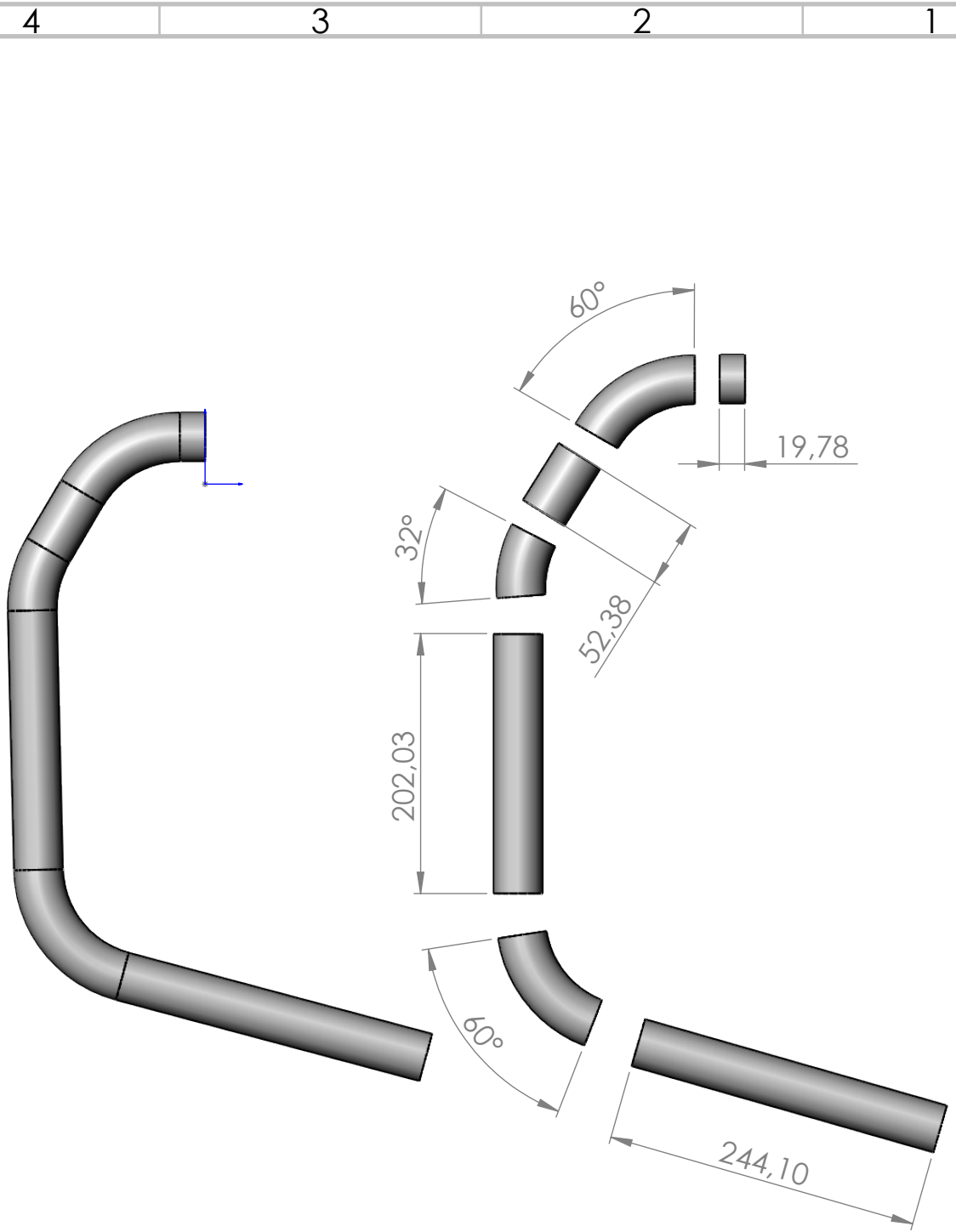
Trat. Térmico: Ninguno		UISEK	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES	
Recubrimiento: Pintura alta temper.				
Material: ASTM A500		Tol. Gral: ± 0.05	Escala: 1 : 5	DIB. Edwin S. Arroyo T.
				DIS. Edwin S. Arroyo T.
				REV. Juan Carlos Rocha H.
TUBO CILINDRO 2			004	Fecha 2017/07/21

A

A

4 3 2 1



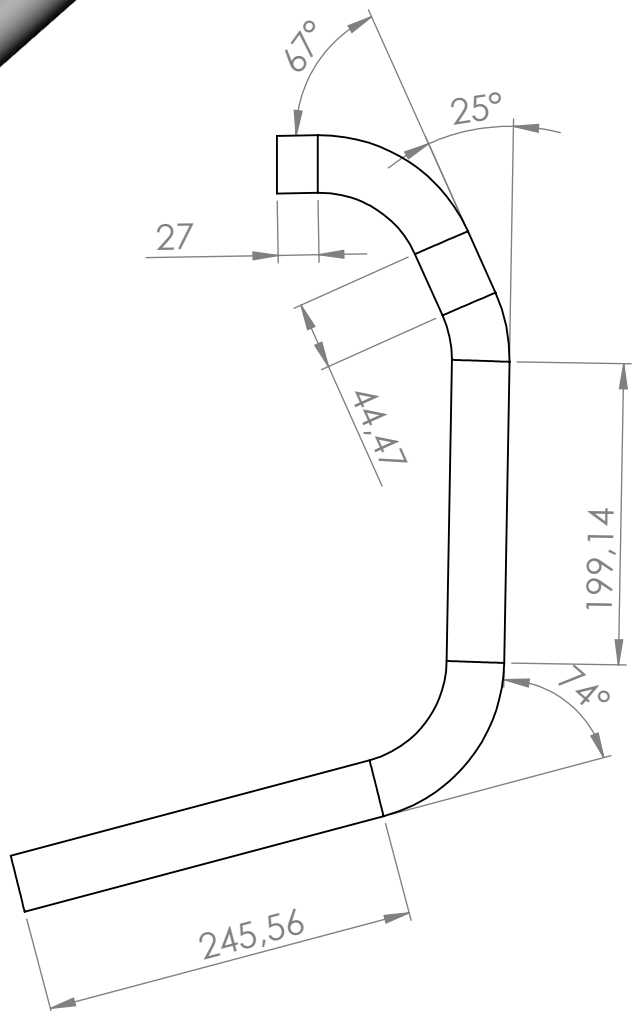
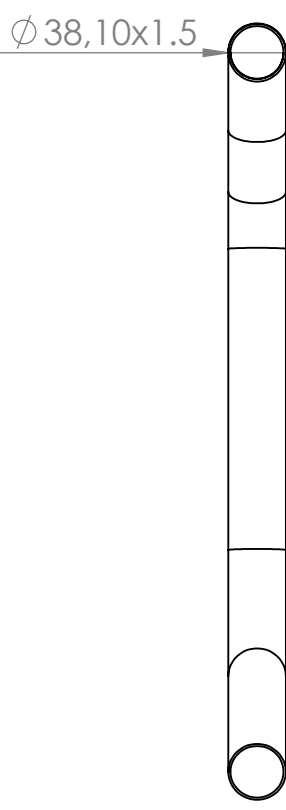
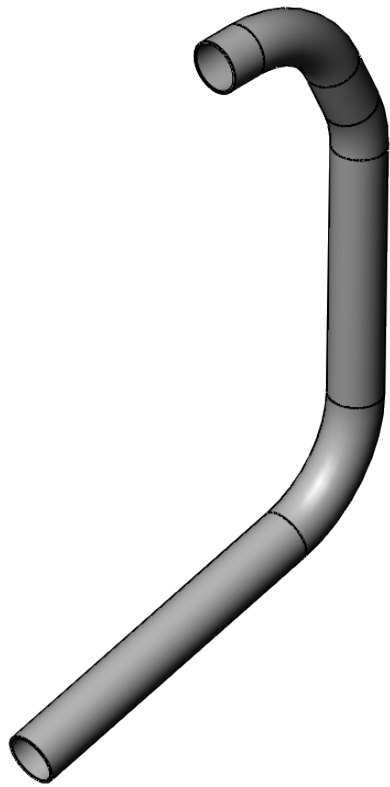


Trat. Térmico:	Ninguno	<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES		
Recubrimiento:	Pintura alta temper.		DIB.	Edwin S. Arroyo T.	
Material:	ASTM A500	Tol. Gral: ± 0.05	ESCALA:	DIS.	Edwin S. Arroyo T.
			1 : 5	REV.	Juan Carlos Rocha H.
SECCIONAMIENTO TUBO CILINDRO 2		005		Fecha 2017/07/21	

4 3 2 1

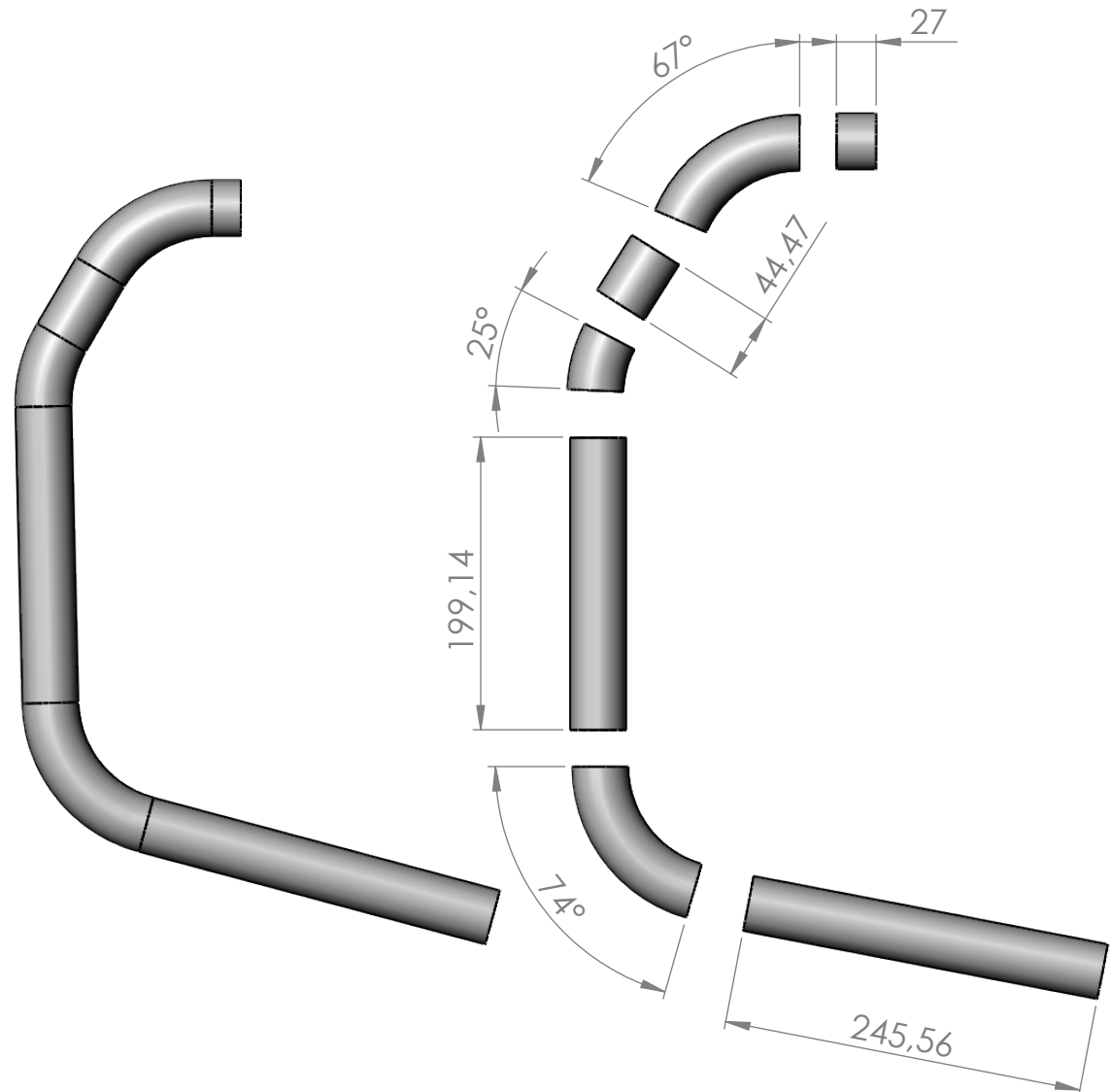
F  
E  
D  
C  
B  
A

F  
E  
D  
C  
B  
A



Trat. Térmico: Ninguno		<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES	
Recubrimiento: Pintura alta temper.				
Material: ASTM A500		Tol. Gral: $\pm 0.05$	Escala: 1 : 5	DIB. Edwin S. Arroyo T.
				DIS. Edwin S. Arroyo T.
				REV. Juan Carlos Rocha H.
TUBO CILINDRO 3		006		Fecha 2017/07/21

4 3 2 1

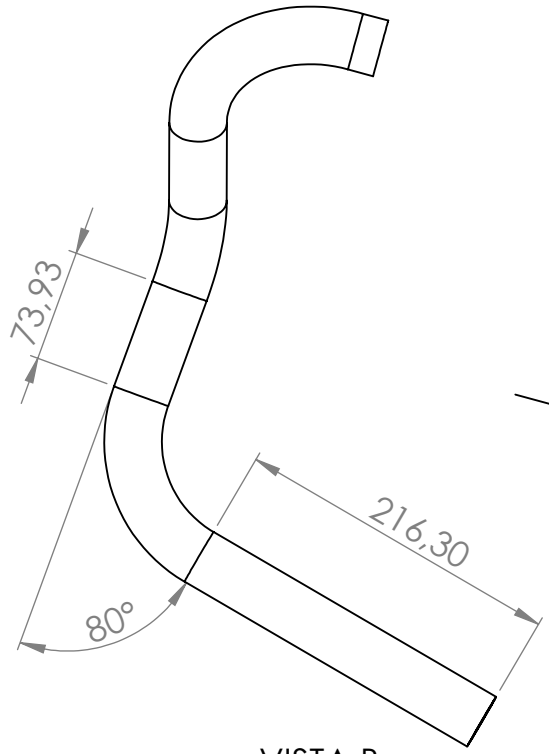
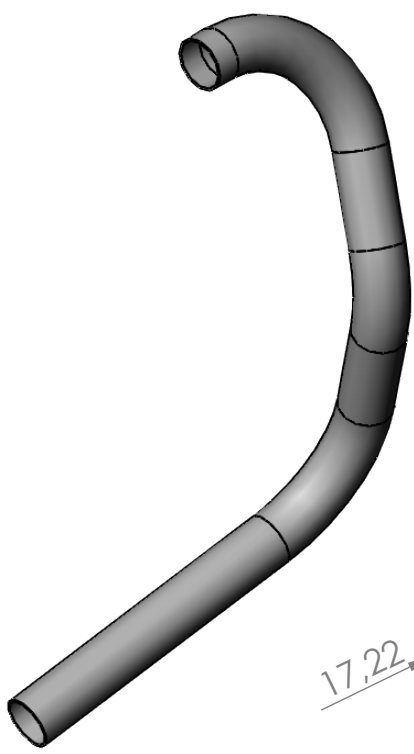


Trat. Térmico:	Ninguno	<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES				
Recubrimiento:	Pintura alta temper.		DIB.	Edwin S. Arroyo T.			
Material:	ASTM A500	Tol. Gral:	± 0.05	ESCALA:	1 : 5	DIS.	Edwin S. Arroyo T.
				REV.	Juan Carlos Rocha H.		
<b>SECCIONAMIENTO TUBO CILINDRO 3</b>				007		Fecha 2017/07/21	

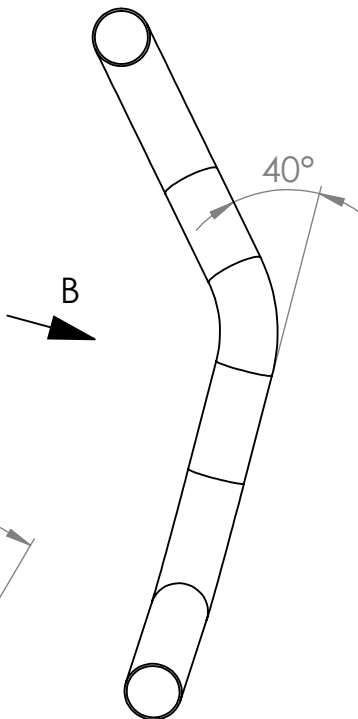
4 3 2 1

F  
E  
D  
C  
B

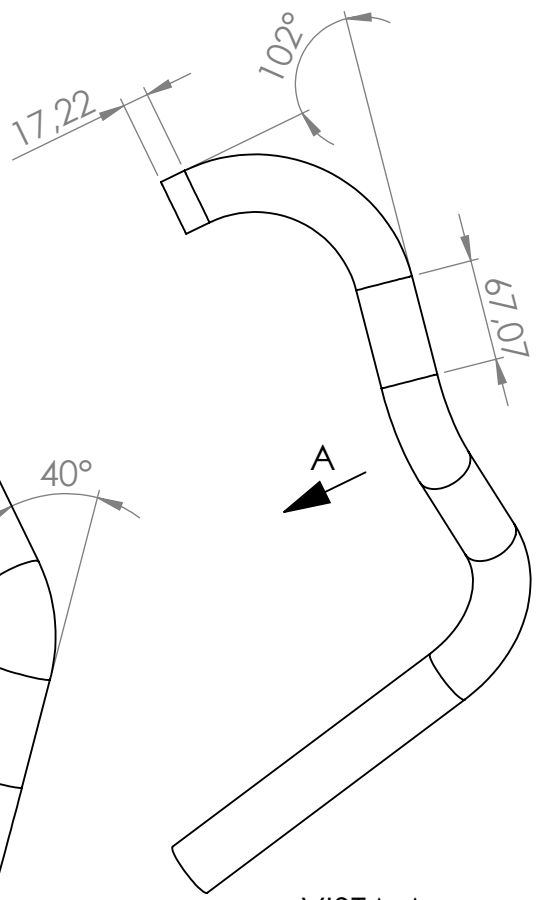
F  
E  
D  
C  
B



VISTA B



B



VISTA A

Trat. Térmico: Ninguno		UISEK	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES	
Recubrimiento: Pintura alta temper.				
Material: ASTM A500		Tol. Gral: ± 0.05	Escala: 1 : 5	DIB. Edwin S. Arroyo T.
				DIS. Edwin S. Arroyo T.
				REV. Juan Carlos Rocha H.
TUBO CILINDRO 4		008		Fecha 2017/07/21

4 3 2 1

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

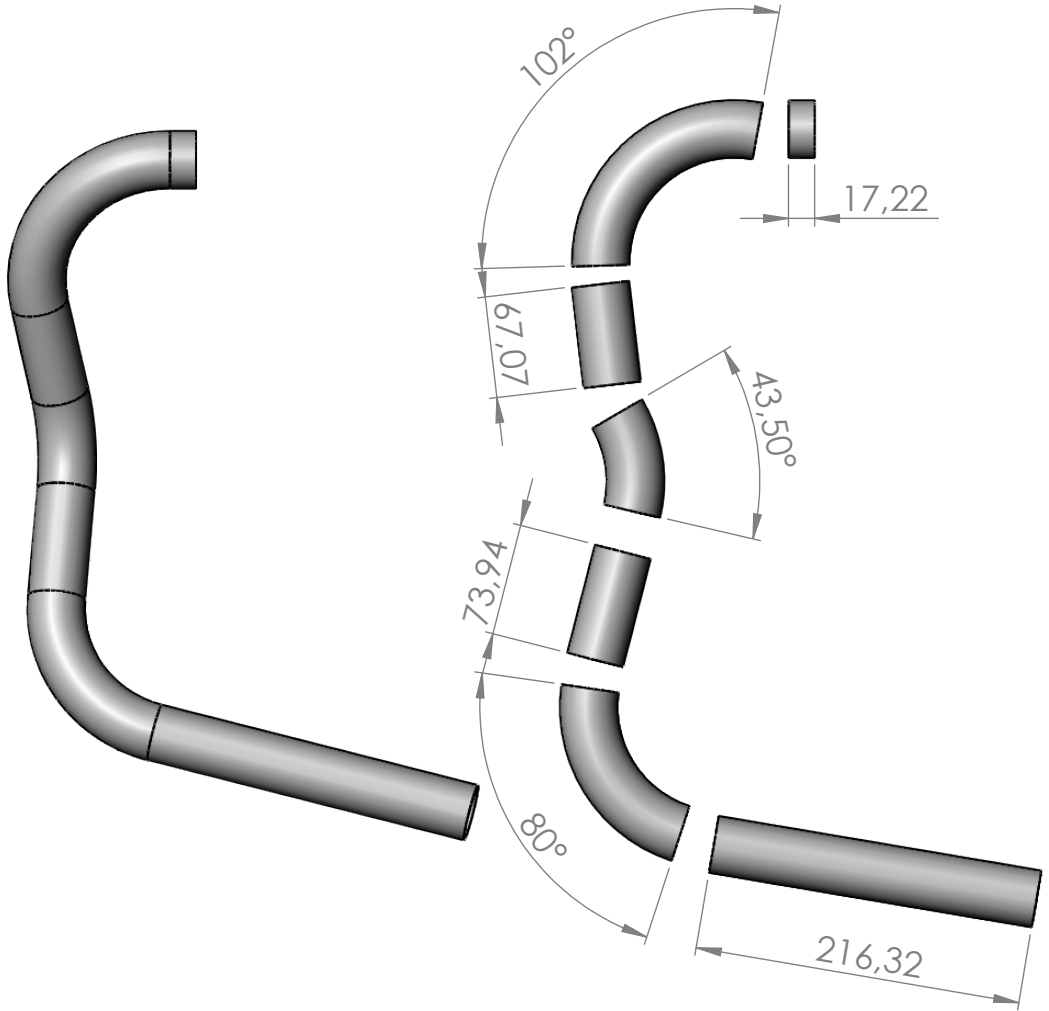
C

B

B

A

A



Trat. Térmico:	Ninguno	<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES				
Recubrimiento:	Pintura alta temper.		DIB.	Edwin S. Arroyo T.			
Material:	ASTM A500	Tol. Gral:	± 0.05	Escala:	1 : 5	DIS.	Edwin S. Arroyo T.
				REV.	Juan Carlos Rocha H.		
<b>SECCIONAMIENTO TUBO CILINDRO 4</b>				009		Fecha 2017/07/21	

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

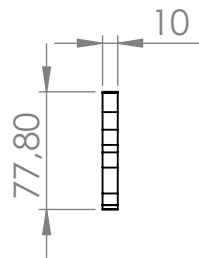
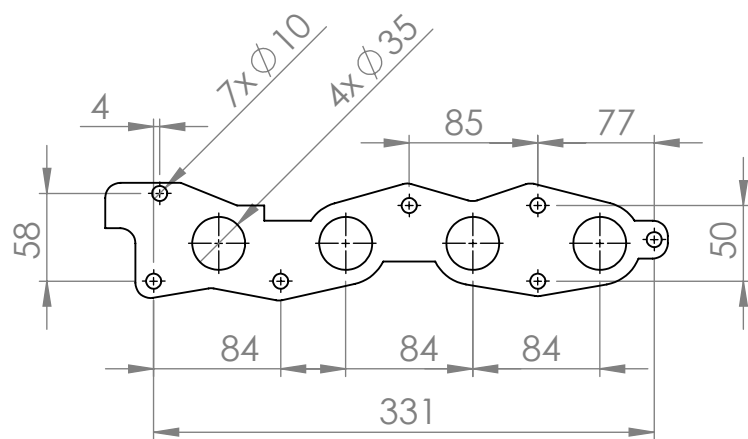
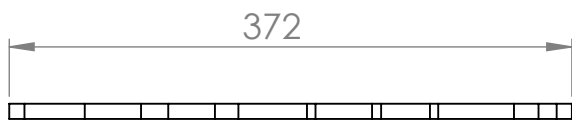
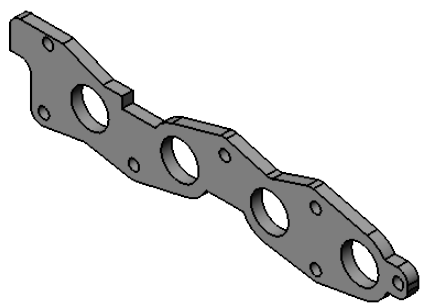
C

B

B

A

A



Trat. Térmico:	Ninguno	<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES				
Recubrimiento:	Pintura alta temper.						
Material:	ASTM A500	Tol. Gral:	± 0.05	Escala:	1 : 5	DIB.	Edwin S. Arroyo T.
						DIS.	Edwin S. Arroyo T.
						REV.	Juan Carlos Rocha H.
PLACA DE SUJECIÓN				010	Fecha	2017/07/21	

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

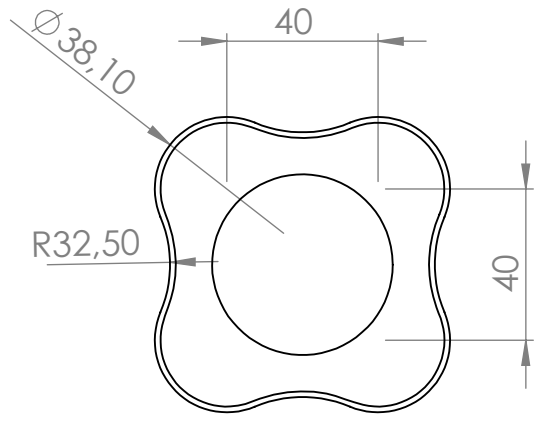
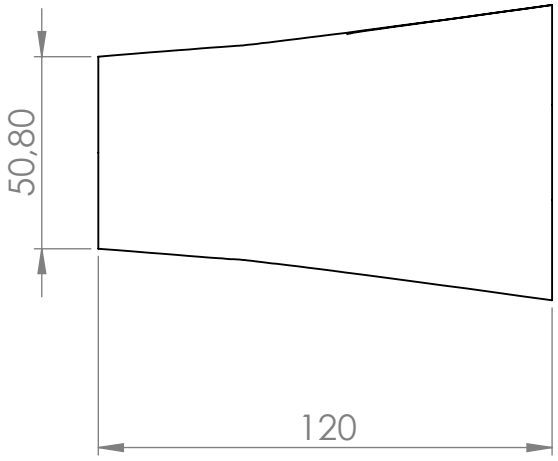
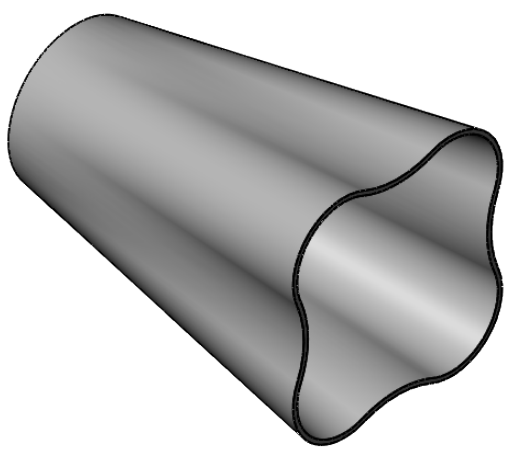
C

B

B

A

A



Trat. Térmico:	Ninguno	<b>UISEK</b>	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES				
Recubrimiento:	Pintura alta temper.		DIB.	Edwin S. Arroyo T.			
Material:	ASTM A500	Tol. Gral:	± 0.05	ESCALA:	1 : 2	DIS.	Edwin S. Arroyo T.
				REV.	Juan Carlos Rocha H.		
<b>COLECTOR</b>				011	Fecha	2017/07/21	

4 3 2 1