

# UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención en Fabricación De Autopartes De Vehículos

Evaluación del flujo de escape del múltiple del MCI en vehículos SUV con materiales no tradicionales

Germán Mauricio Almeida Montenegro

Nota del Autor

German Almeida, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.

Director: PhD. Edilberto Antonio Llanes Cedeño.

Codirector: Ing. Juan Carlos Rocha, M.Sc,

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

galmeida.mdm@uisek.edu.ec

### **Declaración Juramentada**

Yo, Germán Almeida, con cédula de identidad 0401578323, 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.



GERMAN MAURICIO ALMEIDA MONTENEGRO  
C.I.: 0401578323

**Índice de Contenido**

Índice de Contenido.....	3
Índice de Figuras .....	6
Índice de Tablas.....	9
Índice de Formulas .....	10
Resumen.....	11
Abstract .....	12
Introducción .....	13
Antecedentes .....	13
Justificación.....	13
Estado del Arte.....	16
Ondas de presión o pulsos durante la carrera de escape.....	18
Diseño computacional. ....	21
Aplicación de simulaciones en el sistema de escape. ....	24
Pruebas experimentales. ....	28
Método.....	30
Metodología .....	30
Motor de experimento .....	30
Cálculos introductorios.....	31
Determinación de dimensiones. ....	32
Efectos de la configuración del múltiple de escape. ....	34
Simulación 1D.....	35
Simulación 3D.....	43
Modelado 3D.....	43

## EVALUACIÓN DEL FLUJO EN EL MULTIPLE DE ESCAPE

	4
Mallado.....	44
Configuración en CFX-Pre.....	44
Análisis estático. ....	45
Análisis transitorio.....	47
Construcción de Múltiple de Escape .....	50
Pruebas Dinamométricas .....	51
Resultados .....	55
Cálculos introductorios.....	55
Simulación 1D.....	55
Obtención de resultados con múltiple de escape original. ....	56
Obtención de resultados con múltiple de escape configuración 4-1.....	57
Simulación 3D.....	59
Modelado.....	60
Múltiple de escape original. ....	60
Múltiple de escape configuración 4-1 A .....	60
Múltiple de escape configuración 4-1 B.....	61
CFX-Post.....	63
Análisis Transitorio. ....	63
Múltiple de escape original. ....	63
Múltiple de escape 4-1.....	64
Pruebas Dinamométricas .....	65
Obtención de potencia con múltiple de escape original. ....	65
Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, material acero inoxidable.....	66

Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, material aluminizado. .....	67
Obtención de torque con múltiple de escape original.....	68
Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, material acero negro.	68
Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, material acero inoxidable .....	69
Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, material aluminizado	70
Análisis y Discusión de Resultados .....	71
Análisis de los Cálculos Introdutorios .....	71
Simulación 1D.....	71
Configuración 4-1.....	71
Conclusiones .....	88
Bibliografía .....	91
Anexos .....	96

**Índice de Figuras**

Figura 1. Múltiple de escape: (a) 4-1, (b) 4-2-1. ....	15
Figura 2. Método step header.....	15
Figura 3. Diagrama de la distribución de un motor de cuatro tiempos. ....	17
Figura 4. Gasto instantáneo en la válvula de escape .....	20
Figura 5. Forma típica de curvas a plena carga (a) y diferenciación del rendimiento indicado, mecánico y efectivo (b) de un MCI. ....	29
Figura 6. Metodología para la evaluación de múltiples de escape .....	30
Figura 7. Forma de la unión entre los conductos. ....	33
Figura 8. Secciones del sistema de admisión .....	37
Figura 9. Ingreso de parámetros en conductos de admisión .....	38
Figura 10. Secciones del sistema de escape .....	39
Figura 11. Ingreso de parámetros en conductos de escape .....	40
Figura 12. Configuración 4-1 en OpenWAM .....	41
Figura 13. Variables para resultados promedio del motor 4T.....	42
Figura 14. Variables para resultados instantáneos en los cilindros del motor .....	43
Figura 15. Parámetros del dominio en estudio estático .....	46
Figura 16. Condiciones de ingreso en estudio estático.....	47
Figura 17. Simulación estado transitorio .....	48
Figura 18. Condiciones para estado transitorio .....	48
Figura 19. Ajustes del tipo de análisis.....	49
Figura 20. Condiciones de frontera en el ingreso del múltiple de escape .....	50
Figura 21. Roladora de tubos hidráulica.....	51
Figura 22. Múltiple 4-1 fabricado .....	51
Figura 23. Vehículo de pruebas en dinamómetro de chasis LPS 3000 .....	53

Figura 24. Finalización del proceso de simulación en OpenWAM .....	56
Figura 25. Curvas de potencia y torque para múltiple original.....	57
Figura 26. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-1 A .....	58
Figura 27. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-1 B .....	59
Figura 28. Múltiple de escape original: (a) modelado 3D, (b) real.....	60
Figura 29. Múltiple de escape 4-1: (a) modelado 3D, (b) real.....	60
Figura 30. Múltiple de escape 4-1: (a) modelado 3D, (b) volumen interno .....	61
Figura 31. Mallado del dominio en el múltiple de escape original .....	61
Figura 32. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1 .....	62
Figura 33. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1 .....	62
Figura 34. Resultados de la simulación .....	63
Figura 35. Resultados de la velocidad múltiple original .....	64
Figura 36. Resultados de la presión múltiple original.....	64
Figura 37. Resultados de la velocidad en el múltiple fabricado .....	65
Figura 38. Resultados de la Presión en el múltiple fabricado.....	65
Figura 39. Curvas de potencia con múltiple de escape original.....	66
Figura 40. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, material acero negro .....	66
Figura 41. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, acero inoxidable .....	67
Figura 42. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, aluminizado.....	67
Figura 43. Curvas de torque con múltiple de escape original.....	68
Figura 44. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, material acero negro .....	69
Figura 45. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, material acero inoxidable.....	70
Figura 46. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, material aluminizado .....	70
Figura 47. Comparación de potencia para longitudes entre 420 a 800 mm, cada 50 mm..	72
Figura 48. Porcentaje de variación de potencia máxima según configuración de múltiple	74

Figura 49. Porcentaje de variación de torque máximo según configuración de múltiple ..	75
Figura 50. Porcentaje de variación de velocidad de entrada.....	76
Figura 51. Porcentaje de variación de presión de entrada .....	77
Figura 52. Comparación de curvas de potencia .....	78
Figura 53. Comparación de curvas de torque .....	78
Figura 54. Comparación de potencia máxima.....	80
Figura 55. Porcentaje de variación de potencia .....	80
Figura 56. Comparación de torque máximo.....	81
Figura 57. Porcentaje de variación de torque.....	82
Figura 58. Comparación de curvas de potencia del múltiple original .....	83
Figura 59. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple original.....	84
Figura 60. Comparación de curvas de potencia del múltiple 4-1.....	85
Figura 61. Comparación de resultados de potencia para múltiple 4-1 .....	87
Figura 62. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple 4-1 .....	87

**Índice de Tablas**

Tabla 1. Especificaciones del motor.....	31
Tabla 2. Especificaciones de válvulas y conductos.....	31
Tabla 3. Diagrama de orden de encendido y fases. ....	35
Tabla 4. Bloques utilizados OpenWAM.....	35
Tabla 5. Condiciones de trabajo y geometría del motor.....	36
Tabla 6. Definición de modelo y parámetros de ejecución.....	36
Tabla 7. Parámetros de válvulas.....	37
Tabla 8. Parámetros de conductos de admisión .....	38
Tabla 9. Parámetros del sistema de escape .....	40
Tabla 10. Parámetros de la tubería del múltiple de escape .....	41
Tabla 11. Rangos de Skewness y calidad de elemento.....	44
Tabla 12. Parámetros utilizados en el estudio estático .....	45
Tabla 13. Condiciones de borde para análisis estático .....	46
Tabla 14. Parámetros utilizados en el estudio transitorio .....	47
Tabla 15. Condiciones de tiempo en estudio transitorio.....	48
Tabla 16. Dimensiones referenciales iniciales para múltiple de escape. para múltiple de escape.....	55
Tabla 17. Potencia obtenida al variar las longitudes del colector en pasos de 50 mm.....	57
Tabla 18. Resultados obtenidos en OpenWAM de potencia y torque para múltiple de escape 4-1.....	58
Tabla 19. Resultados.....	59
Tabla 20. Tabla estadística de valoración de potencia al variar la longitud del colector de 420 a 800 mm.....	71

Tabla 21. Tabla estadística de valoración de torque y potencia según la configuración del múltiple .....	73
Tabla 22. Tabla estadística de los parámetros en la entrada del múltiple.....	76
Tabla 23. Tabla estadística de potencia y torque medidos .....	79
Tabla 24. Diferencia de resultados potencia entre simulación y pruebas dinamométricas para múltiple origina.....	84
Tabla 25. Diferencia de resultados potencia entre simulación y pruebas dinamométricas para múltiple 4-1. ....	86

### **Índice de Formulas**

Ecuación 1.....	32
Ecuación 2.....	32
Ecuación 3.....	33
Ecuación 4.....	33
Ecuación 5.....	54

### Resumen

El múltiple de escape de los vehículos generalmente son fabricados de hierro fundido, la calidad superficial de los hierros fundidos no es la mejor entre los materiales existentes, generando pérdidas en los motores de combustión interna por la salida de gases de escape debido a la forma, rugosidad o material de los ductos del múltiple. En la presente investigación se diseñó y construyó el múltiple de escape para un vehículo Renault Duster con motor K4M. Para su simulación, se utilizó un modelo de motor unidimensional en el software OpenWAM, modificando el diseño del múltiple de escape y las dimensiones para elevar el rendimiento respecto al sistema original. Con el modelado 3D se llevó a cabo un estudio CFD, obteniendo las dimensiones de la tubería más adecuada. El diseño óptimo según las simulaciones se fabricó utilizando materiales como acero negro, acero inoxidable y aluminizado, 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 6.4 % según el múltiple en aluminizado; así como un aumento de torque de 1.4 % para el mismo múltiple. La comparación de los resultados entre simulaciones y pruebas experimentales demuestra que la metodología empleada es apropiada para el diseño del sistema de escape que mejore el desempeño del motor

Palabras Claves: Simulación, OpenWAM, múltiple de escape, materiales.

### **Abstract**

The exhaust manifold of the vehicles are usually made of cast iron, the surface quality of the cast irons is not the best among the existing materials, generating losses in the internal combustion engines by the exit of exhaust gases due to the form, roughness or material of manifold ducts. In the present investigation, the exhaust manifold was designed and built for a Renault Duster vehicle with K4M engine. For its simulation, a one-dimensional engine model was used in the OpenWAM software, modifying the design of the exhaust manifold and the dimensions to increase the performance with respect to the original system. With 3D modeling, a CFD study was carried out, obtaining the dimensions of the most suitable pipe. The optimal design according to the simulations was made using materials such as black steel, stainless steel and aluminized, 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 6.4% according to the multiple in aluminized; as well as a torque increase of 1.4% for the same manifold. The comparison of the results between simulations and experimental tests shows that the methodology used is appropriate for the design of the exhaust system that improves engine performance

Keywords: Simulation, OpenWAM, exhaust manifold, materials

## **Introducción**

### **Antecedentes**

En el presente estudio se realizará la evaluación del flujo de escape del múltiple de admisión del Renault Duster 1.6, con materiales no convencionales ya que este SUV es el de menor costo en el mercado nacional (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, 2016).

### **Justificación**

En Ecuador el desarrollo de autopartes se ha desarrollado hace más de 30 años, cuando en el país surgió la necesidad de ensamblaje de vehículos. Esto lo realizaron a base de la experticia adquirida por algunos técnicos y talleres especializados mediante procesos de fabricación de prueba y error, teniendo como consecuencia costos elevados a causa de varias horas hombre y materia prima. Pero, en los últimos años, el sector de fabricación de autopartes ecuatoriano ha sufrido un crecimiento que ha exigido a los productores nacionales la preparación y especialización de personal en varias áreas específicas, la utilización de programas de modelado y simulación computacional, la adquisición y uso de herramientas, maquinaria y bancos de prueba de alta tecnología, con el fin de ser competitivos en el mercado nacional y cumpliendo los estándares globales, obteniendo así disminuir el tiempo de fabricación y por ende reducción de costos. (El Comercio, 2011)

Aparentemente, en algunas autopartes se creía que las mejores prestaciones son las autopartes importadas las cuales muchas veces se comercializan a precios elevados y sin considerar las condiciones de diseño y de funcionamiento debido a factores geográficos nacionales. Actualmente la mayor parte de industria ecuatoriana se ha dedicado a ser distribuidora de materia prima e importadora de los productos con mayor valor agregado, según índices del año 2012 de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.

El gobierno ecuatoriano está fomentando la transformación de la matriz productiva, que permita manejar un modelo democrático, inclusivo y fomentado en las capacidades y conocimiento 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 de productos que la industria ecuatoriana tiene capacidad para fabricarlos, por ejemplo: tecnología e industria metalmecánica (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2012)

La investigación realizada 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 estas desde los mercados internacionales. El mejoramiento de potencia de un motor es una de las principales necesidades en un vehículo y para lograrlo existen varias modificaciones que pueden ser efectuadas, estas pueden ser, mecánicas o electrónicas, considerando materiales y mejores diseños.

Por lo general en los vehículos, una de las autopartes para mejorar empíricamente la eficiencia del motor es el múltiple de escape, un elemento que recibe constantemente los gases de escape que se originan en los cilindros del motor, saliendo desde la culata hasta la primera brida de unión que lo separa del resto del tubo de escape, según lo define la (Federación Internacional del Automovilismo, 2017). El múltiple de escape se fabrica con tubería de sección circular, se utilizan tubos de acero negro, galvanizado o inoxidable pudiendo tener una configuración 4-1 o 4-2-1, como se ilustra en la figura 1.

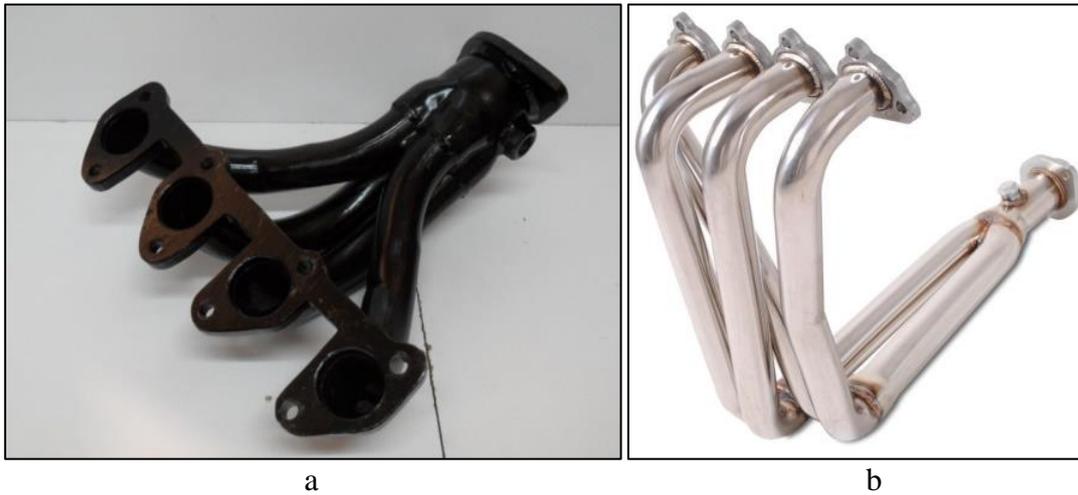


Figura 1. Múltiple de escape: (a) 4-1, (b) 4-2-1.  
(Arroyo Teran, 2017)

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 deformación de la sección circular teniendo una reducción de área por aplastamiento en la zona de curvatura. El otro proceso se conoce como step header, mediante la soldadura de tramos de tubería, utilizando tubos pre-doblados que mantienen la sección circular uniforme durante todo su recorrido, como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Método step header  
(Deshmukh, Kumar, Garg, Nayeem, & Lakshminarasimhan, 2004)

Para esta investigación la fabricación del múltiple de escape se lo realizara con materiales no tradicionales utilizando tubería metálica de tres materiales diferentes: acero negro A500, acero inoxidable 904 y aluminizado Grado A y evaluar el flujo de escape para cada material.

Para esta investigación se requiere que se lo haga con el menor uso de recursos, para los cual el proyecto tiene como objetivo general: evaluar y construir el múltiple de escape con materiales no convencionales, a partir de la simulación computacional 1D y 3D, para validarlo 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 el software 1D OpenWAM, diseñar el múltiple en el software Inventor, realizar un análisis computacional de fluidos en el software 3D Autodesk CFD, fabricar el múltiple de escape con tres materiales diferentes al estándar y probar los múltiples construidos con el vehículo en un dinamómetro para comparar resultados respecto al sistema original.

### **Estado del Arte**

El motor de combustión interna realiza una transformación de energía térmica en mecánica. Dentro de este grupo se encuentra el motor de combustión interna alternativo, que según su proceso de encendido puede ser de encendido provocado o de compresión (Benajes & Navarro, 2011)

Los adelantos y retrasos de cierre y apertura en las válvulas de admisión y escape optimizan la cámara de combustión del motor, mejorando las prestaciones y rendimiento (Payri & Desantes, Motores de combustion interna alternativos, 2011) La figura 1 indica el diagrama de distribución de un motor de cuatro tiempos con los respectivos ángulos: avance abierto admisión (AAA), retraso cierre de admisión (RCA), avance abierto de escape (AAE)

y retraso cierre de escape (RCE).

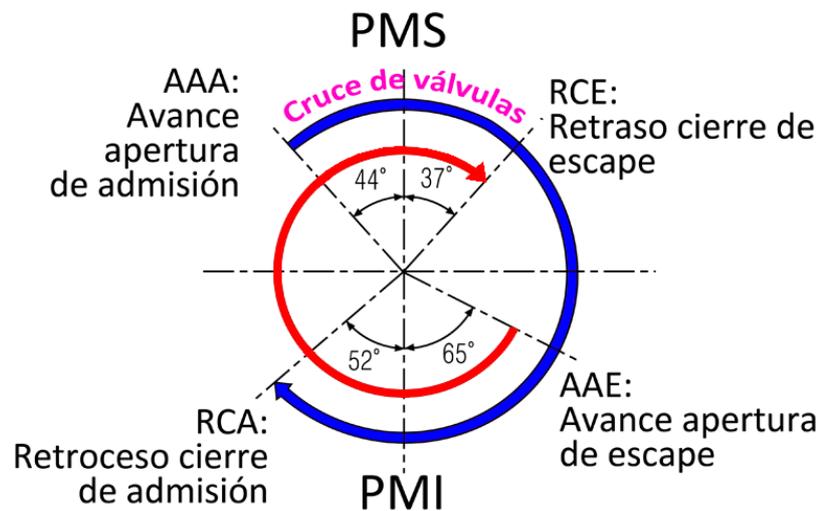


Figura 3. Diagrama de la distribución de un motor de cuatro tiempos.

(Benajes & Navarro, 2011)

El uso de aditivos y elementos que mejoran el rendimiento, para este estudio el rediseño de múltiples de admisión está orientados a dos casos, una es mejorar los procesos termodinámicos del ciclo de trabajo, mejorando el trabajo indicado ( $W_i$ ), y otra es incrementar el rendimiento mecánico con la reducción de pérdidas entre el trabajo de transferencia de los gases al pistón y el trabajo mecánico disponible en el eje de salida o trabajo efectivo ( $W_e$ ). La resta entre el trabajo efectivo y el trabajo indicado se conoce como pérdidas por trabajo mecánico ( $W_{pm}$ ), las cuales pueden ser de fricción, de bombeo o de accionamiento de auxiliares (Bermudez & Tormos, 2011)

En un período de trabajo completo, un motor Otto de cuatro tiempos traza dos curvas tipo lazo 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).

Los aspectos que más influyen en las pérdidas mecánicas por bombeo ( $pmb$ ) en un MEP, según los autores Bermúdez y Tormos (2011), donde indican que:

- Pérdida de carga en el sistema de admisión por resistencia en el paso de aire.
  - Contrapresión de escape, debido a la resistencia ofrecida en el trayecto.
  - Avances y retrasos en el diagrama de distribución del motor para optimizar los procesos de admisión y escape.
- 
- Geometría de los múltiples de admisión y escape con el fin de optimizar el llenado de los cilindros y la reducción de las pérdidas por bombeo.

Las pérdidas de bombeo al originarse en el proceso de renovación de la carga, se las puede modificar en base al dimensionamiento adecuado de válvulas de admisión y escape también con el diseño de la ductería de admisión y escape coordinados con el diagrama de distribución (Bermudez & Tormos, 2011)

Cuando se incrementa la velocidad del motor, al reducir las pérdidas por fricción o aumentar la eficiencia volumétrica, térmica y de combustión, se mejora la potencia en el motor. En la cual la eficiencia volumétrica tiene un mayor impacto en el rendimiento, y consiste en la eficacia que tiene el reemplazo de los gases quemados y el llenado del cilindro con gases frescos, o también conocido proceso de renovación de la carga (Deshmukh, Kumar, Garg, Nayeem, & Lakshminarasimhan, 2004).

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

Inmerso al proceso de renovación de la carga suceden 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). (Galindo, Lujan, Serrano, Dolz, & Guilain, 2004)

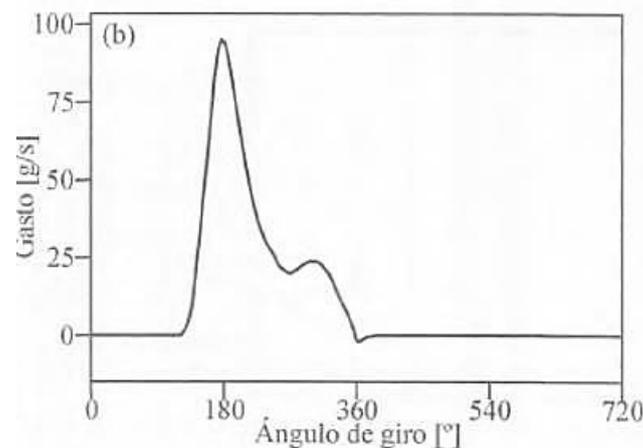
Dicha configuración de múltiple 4-2-1, uniendo los conductos primarios del cilindro 1-2 y el 3-4 para luego conectarlos en una junta tipo Y, fue usada por Masi, Toffolo y Antonello (2010) (Masi, Toffolo, & Antonello, 2010) en una motocicleta Kawasaki ZX6R-07 con motor de 599 cc, orden de encendido 1-2-4-3, al cual se aplicó además y con otras modificaciones del motor, 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).

Para reducir las interferencias entre cilindros, se diseñan las juntas de los canales en los múltiples de escape para dar un efecto direccional o eyector, donde su función 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)

El motor tiene un funcionamiento no estacionario, que se puede considerar como funcionamiento cuasi periódico, donde el flujo en los canales de admisión y escape son de carácter no estacionario. En la curva de gasto másico en la válvula de escape, figura 4, 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 4.* Gasto instantáneo en la válvula de escape (sentido positivo saliente del cilindro) (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 a la salida de la junta del colector cuando el funcionamiento 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 elevada con la que los gases de escape salen de los cilindros es un factor

para considerarse, por lo que no puede despreciarse la transferencia de calor entre los gases y la pared de los conductos. Dicho intercambio de calor influye en la temperatura de los gases de escape de los colectores, así como en la velocidad con que las ondas de presión se propagan, para 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)

En la investigación de Calderón y Ortiz (2017) se fabricó un múltiple de admisión de similar diseño que el original con materiales no convencionales para el vehículo Chevrolet Aveo y luego se realizan pruebas de torque y potencia por cada material para analizar el comportamiento de los parámetros del motor, determinando que uno de los materiales no convencionales mejora el rendimiento del motor en un 6% en relación al múltiple original.

### **Diseño computacional.**

Actualmente, 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 cero dimensionales (0D), unidimensionales (1D) o multidimensionales (2D o 3D). En los modelos unidimensionales, se realiza la solución espacial en una de sus variables analizadas, mientras que, en los multidimensionales se realiza la solución considerando las transiciones de las propiedades del sistema en sus 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 cero dimensionales y elementos no dimensionales (Galindo & Hernández, 2011). En la Universidad Politécnica de Valencia se 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 (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, J.; Tiseira, A.; Fajardo, P.; Navarro, R., 2011).

El modelo de conducto es la base de los modelos de acción de ondas, donde las variables de entrada son los valores de las condiciones de borde del fluido en los extremos y su

geometría. Teniendo como solución o variables de salida a la presión, temperatura densidad y velocidad en función de la posición interna del ducto y del tiempo. Las ecuaciones empleadas para la resolución de este modelo dependen del estado analizado, así como de la conservación de masa, energía y cantidad de movimiento. Un caso particular de las ecuaciones de Navier-Stokes es el sistema de ecuaciones de Euler planteado para un flujo ideal no viscoso en un dominio cuasi unidimensional. (Galindo & Hernández, 2011, pág. 754)

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).

El software Autodesk® CFD proporciona dinámicas de fluidos computacionales y herramientas de simulación térmica para ayudarlo a predecir el rendimiento del producto, optimizar los diseños y validar el comportamiento del producto antes de la fabricación (Autodesk, 2019). Este software es utilizado para modelar transferencia de calor en geometrías complejas así como flujo de fluidos (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 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  $\kappa - \epsilon$ , 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 donde basándose en el método de las características para el proceso de intercambio de información con 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 al ingresar las condiciones de borde para el análisis de flujo 3D 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  $\kappa - \epsilon$  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 sí 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 experimentales.**

Un dinamómetro es un equipo que permite conseguir curvas específicas del motor obteniendo datos de la potencia, par motor consumo específico de combustible en función del régimen de giro. Las curvas específicas de un motor de combustión interna que trabaja a plena carga se logran 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 diferentes dinamómetros que permiten valorar el funcionamiento de un MCI 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 forma de las curvas específicas para un MCI a plena carga (ver figura 5) se debe al

funcionamiento con el régimen de las variables que cada parámetro depende, así entonces, el par motor depende de los rendimientos mecánico, indicado y volumétrico, mientras que, la potencia va a depender de la velocidad angular del cigüeñal y del par motor. (Rodríguez & Nogueira, 2011)

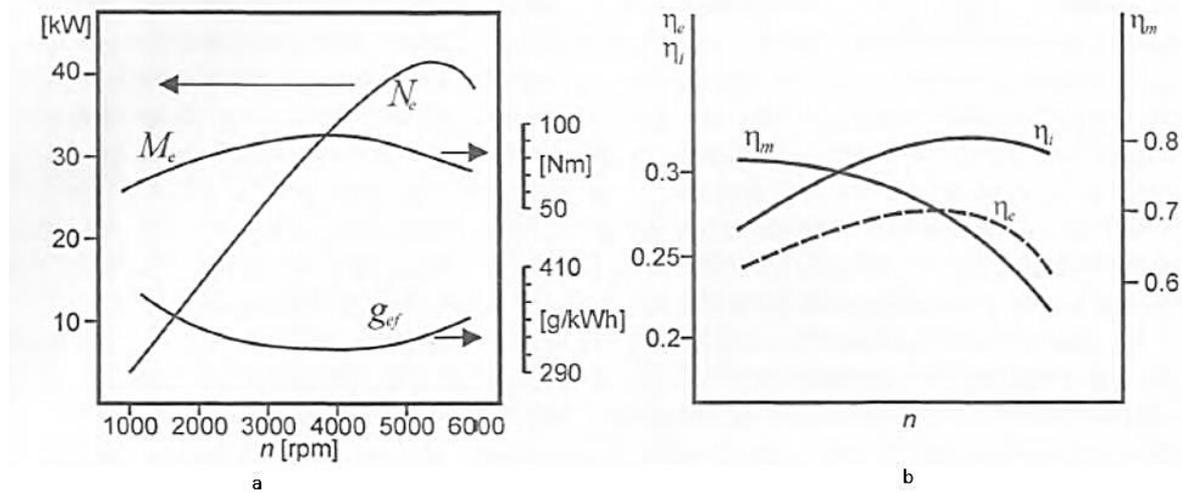


Figura 5. Forma típica de curvas a plena carga (a) y diferenciación del rendimiento indicado, mecánico y efectivo (b) de un MCI.

(Rodríguez & Nogueira, 2011)

## Método

### Metodología

La investigación se va a realizar en un vehículo utilitario deportivo SUV, donde se va a investigar el comportamiento que tienen los gases de combustión en el múltiple de escape fabricados en secciones de tubería metálica con diferentes materiales para analizar el comportamiento del motor, mediante el método de diseño computacional 1D/3D y su validación experimental mediante pruebas dinámicas según a la norma INEN 960, en la figura se muestra la metodología empleada en la investigación. (Arroyo Teran, 2017)

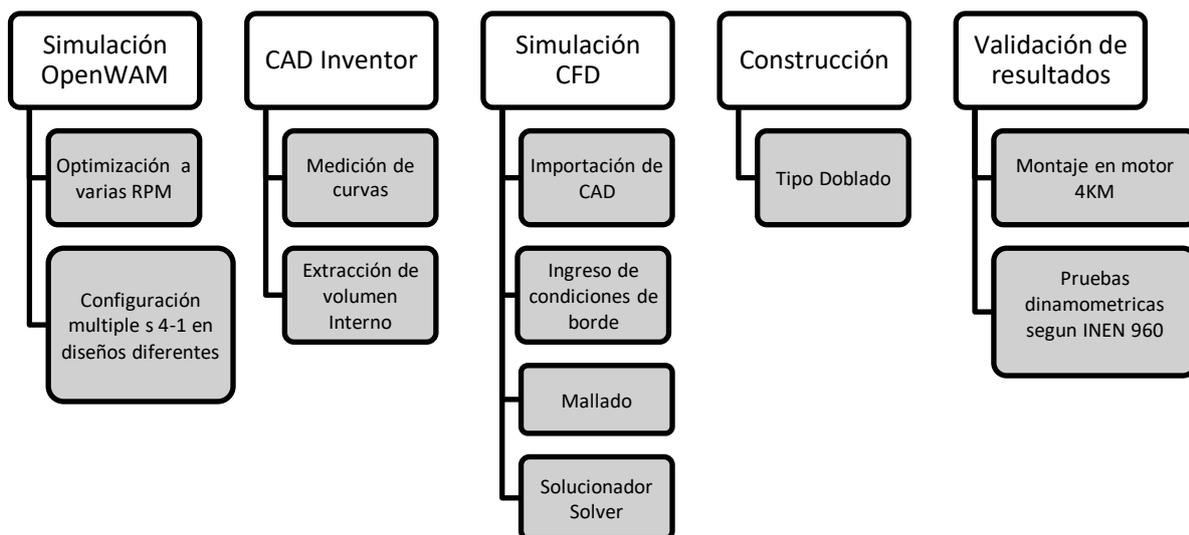


Figura 6. Metodología para la evaluación de múltiples de escape

### Motor de experimento

Se utilizará un vehículo SUV que se tiene disponible para esta investigación, el Renault Duster 1.6, que dispone de un motor de cuatro cilindros en línea, doble árbol de levas con cuatro válvulas por cilindro. Esta versión de Duster trae un múltiple de escape con una configuración 4-1 de fábrica. Las características del motor se describen en la tabla 1.

Tabla 1.

*Especificaciones del motor*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Motor	K4M, 4 cilindros, 4 tiempos, DOHC
Cilindrada (fiscal)	1599 cm <sup>3</sup>
Diámetro x carrera	79.5 x 80.5 mm
Relación de compresión	10:1
Potencia	80.9 kW @ 5750 rpm
Torque	145.13 Nm @ 3750 rpm
Combustible	Gasolina
Sistema de encendido	Bobinas independientes
Orden de encendido	1-3-4-2
Reglaje de encendido - básico APMS	6 ± 1/800 °APMS/rpm
Sistema de combustible	MPF-i
Medidor de aire	Flujo masa de aire (MAF)
Régimen de ralentí	800 ± 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

Nota: Autor, Ficha técnica Renault Duster 1.6, Automotores y Anexos

En la tabla 2 se muestran las especificaciones de las válvulas y conductos de admisión y escape en el cabezote del motor K4M 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	32.7 mm		27.96 mm	
Longitud de los conductos de válvulas	109.32 mm		107.64 mm	
Diámetro del conducto	33.542 mm		28.792 mm	
Elevación de válvula(lift)	9.221 mm		8.075 mm	
	AAA	RCA	AAE	RCE
Sincronización de válvulas	8° APMS	36° DPMS	42° APMS	10° DPMS

Nota: Autor, (Renault Manual de Reparación Motor K4M, 1998)

**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 1.

$$L_c = \frac{13000 \times Ge}{n \times 6} [cm] \quad (1)$$

Donde,  $L_c$ : 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 2, considerando  $V_c$  como la cilindrada unitaria en  $cm^3$ . 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.

$$\varnothing = 2 \sqrt{\frac{V_c \times 2}{L_c \times \pi}} [cm] \quad (2)$$

Para la unión de los tubos se sugiere una caja de expansión, como la mostrada en la Figura 7, que permita la unión de los gases en un solo flujo.

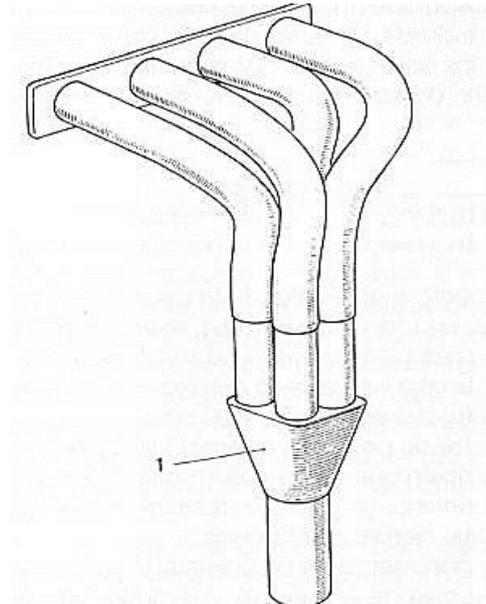


Figura 7. Forma de la unión entre los conductos.

(Gillieri, 2007)

El diámetro del trayecto final del tubo de escape se calcula por la ecuación 3, 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).

$$\phi T_e = 2 \times \sqrt{\frac{V_t}{L_c \times \pi}} [cm] \quad (3)$$

En otros estudios de sistemas de escape, como los realizados por Jawad, Biggs, y 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°).

$$L = \frac{\theta_t \times C}{0.012 \times n} [mm] \quad (4)$$

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 4-1 y sus efectos en las curvas de potencia y torque. En la configuración 4-1 se unió los cuatro cilindros en un colector.

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 utilizará 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 OpenWAM

Tipo	Bloque	Definición
Motores		Motor 4T
		Cilindro 4T
Nodos de unión		Ramificación
		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 K4M para obtener las curvas de torque y potencia máximo utilizado en el modelado utilizan altas revoluciones y se detallan 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)	2000 a 5800
Poder calorífico del combustible (kJ/kg)	41870
Densidad de combustible (kg/m <sup>3</sup> )	854
Longitud de biela (mm)	128
Carrera de pistón (mm)	80.5
Diámetro de cilindro (mm)	79.5
Relación de compresión	10
Orden de encendido	1-3-4-2

Nota: Autor, (Renault Manual de Reparación Motor K4M, 1998)

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
Submodelo	Without correction

Nota: Autor, (Renault Manual de Reparación Motor K4M, 1998)

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

Tabla 7.

Parámetros de válvulas

Parámetro	Admisión	Escape
Diámetro de válvula (mm)	32.7	27.96
Ángulo de apertura de válvula (°)	350	135
Control de velocidad	Motor	Motor
Relación de velocidad	1	1
Diámetro de referencia para cálculo Cd (mm)	32.7	27.96

Nota: Autor, (Renault Manual de Reparación Motor K4M, 1998)

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 8.

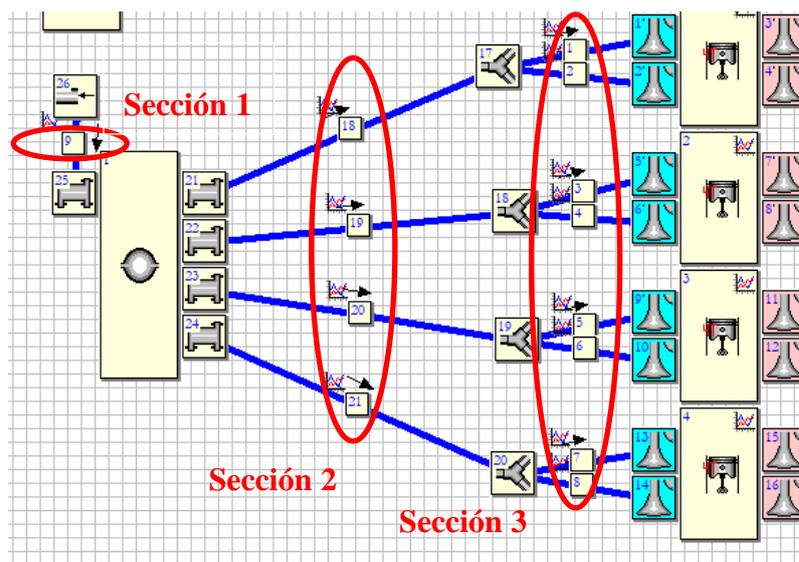


Figura 8. Secciones del sistema de admisión

De acuerdo con 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 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
N° of intercooler ducts	1

Note: Duct roughness (mm)

Buttons: Data, Geometry, Numerical method, Composition, Accept, Cancel

Figura 9. 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.

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)	75	45	45
Longitud (mm)	35	280	80
Diámetro de salida (mm)	71	45	32
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 10. 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.

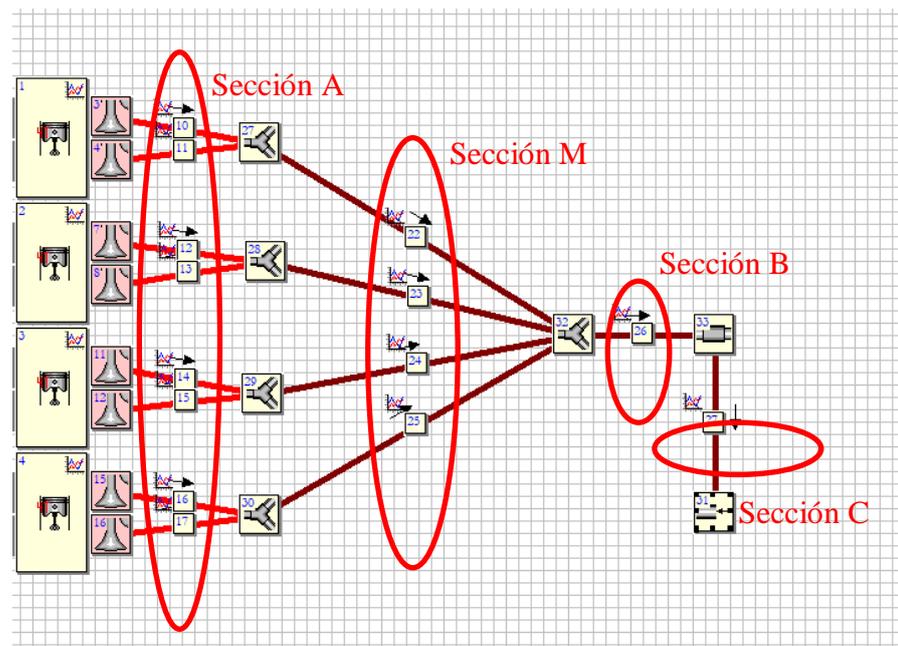


Figura 10. Secciones del sistema de escape

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 11.

Defining duct number 14

Property	Value
Inlet diameter (mm)	28.9

Nº	Length (mm)	Outlet diameter (mm)
1	87	35

Data Geometry Numerical method Composition

OK Cancel

Figura 11. Ingreso de parámetros en conductos de escape

Los parámetros ingresados en los conductos de acuerdo con 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)	28.9	47.8	47.8
Longitud (mm)	87	1250	1180
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 los 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.

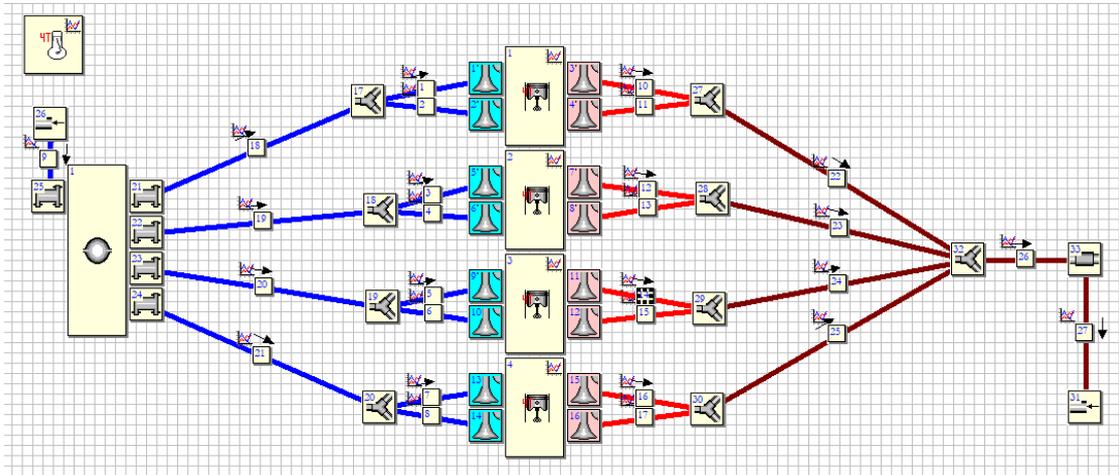


Figura 12. Configuración 4-1 en OpenWAM

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

Tabla 10.

Parámetros de la tubería del múltiple de escape

Parámetro	Original (configuración 4-1)	Configuración 4-1
Espacio de malla (m)	0.0025	0.0025
Tipo de conducto	Tubería de escape	Tubería de escape
Cálculo de temperatura de pared	Constante	Constante
Rugosidad de conducto (mm)	0.15	0.15
Diámetro de entrada (mm)	35	35.1
Longitud (mm)	500 a 700	500 a 800
Diámetro de salida (mm)	49	49
Método numérico	Lax Wendroff	Lax Wendroff
Submodelo	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 13 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.

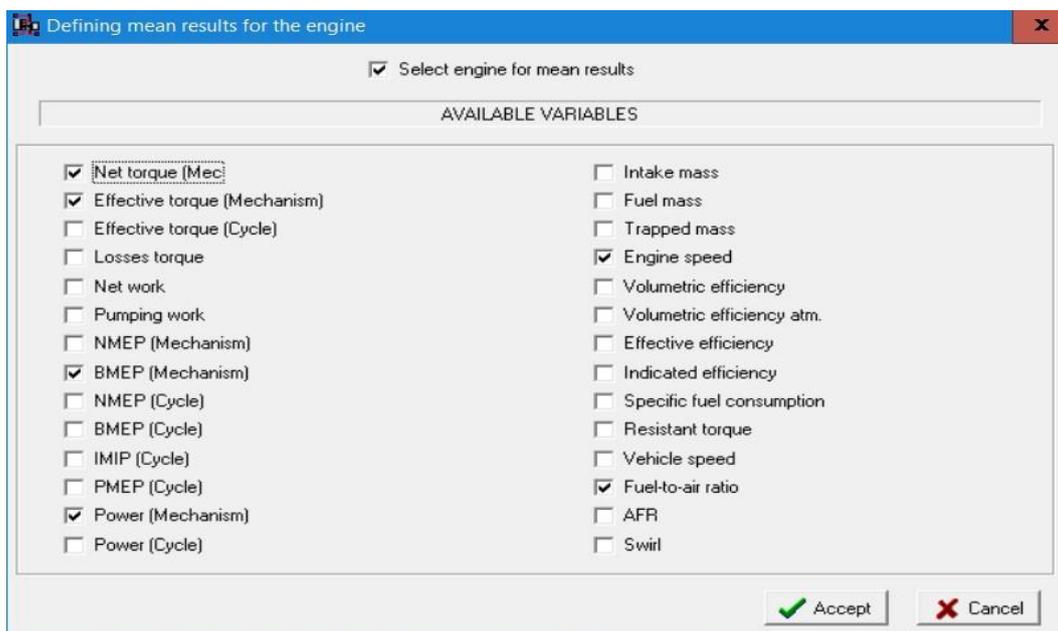


Figura 13. Variables para resultados promedio del motor 4T

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 14, muestra la selección de los variables instantáneas disponibles en los resultados del cilindro número 1.

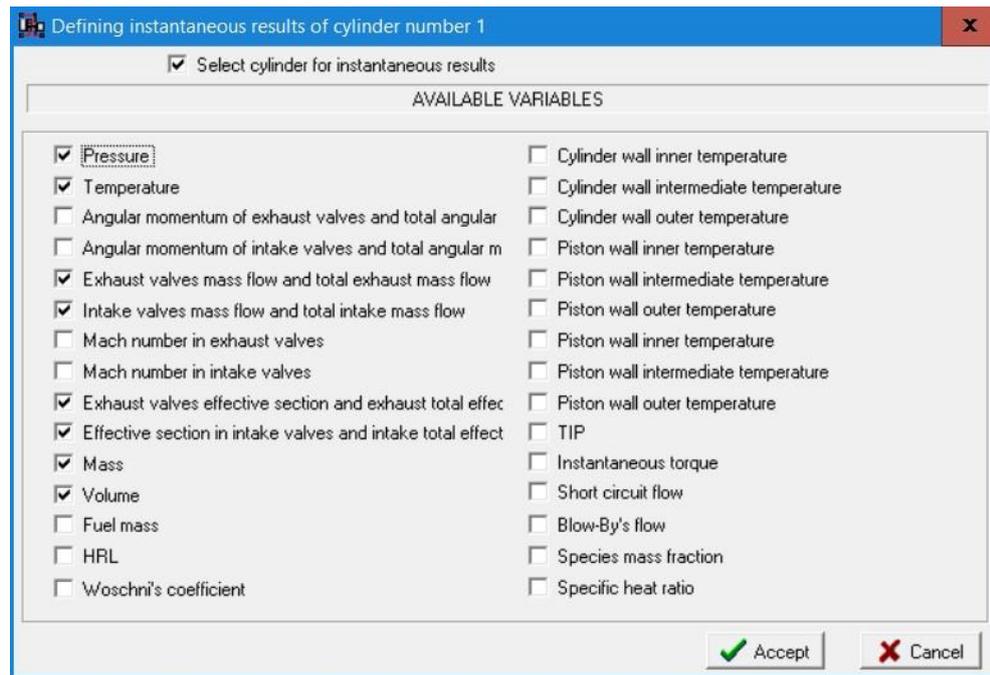


Figura 14. Variables para resultados instantáneos en los cilindros del motor

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 esta.

### Simulación 3D

#### Modelado 3D.

El modelado 3D se realizará en el software Autodesk CFD, 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 considerará 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 buscará 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, resultará 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 utilizarán elementos tetraédricos, con un tamaño de 0.25 - 0.5 m. La precisión de los resultados está ligada a la calidad de la malla. Para la verificación de los elementos de la malla se utilizará 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 CFD-Pre.**

Para la simulación CFD se utilizó el paquete estudiantil del software Autodesk CFD , que se basa en el método de resolución por volúmenes finitos.

Se realizarán 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, & Sanchez, 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 indican los parámetros seleccionados para el dominio y control de *solver* en el análisis estático. Se considerará 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

<b>Parámetro</b>	<b>Condición</b>
Tipo de análisis	Estático
Material del dominio	Aire (Gas ideal)
Presión de referencia	1 [atm]
Transferencia de calor	Energía térmica
Modelo de turbulencia	$\kappa - \varepsilon$

Las condiciones determinadas en la tabla 9 se ingresan durante el preprocesamiento en CFD, al definir los parámetros del dominio mediante los ajustes básicos y el modelo del fluido, como se muestra en la figura 15.

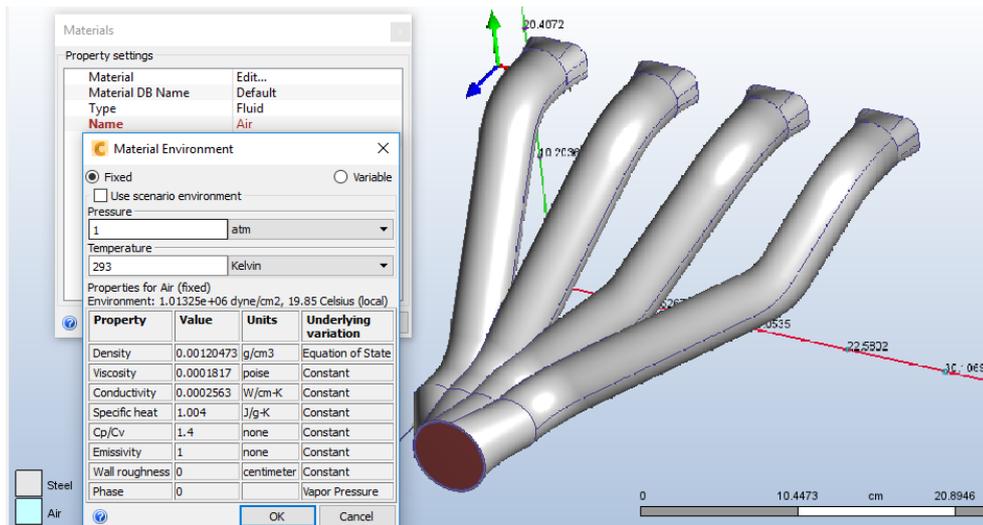


Figura 15. Parámetros del dominio en estudio estático

Las condiciones de contorno seleccionadas para el estudio estático serán tomadas de los análisis unidimensionales en OpenWAM, que se realizarán a 5800 rpm con la velocidad de giro del motor, esta es la recomendada por el fabricante según el manual del vehículo para la potencia máxima, como se indica en la tabla 5.

Tabla 13.

Condiciones de borde para análisis estático

Condición de borde	Tipo	Valor
Ingreso	Presión total	1.2 [bar]
	Intensidad de turbulencia	5%
	Temperatura estática	975 [K]
Salida	Presión estática	1.013 [bar]

En la figura 16, se observa la inclusión de las condiciones de contorno en el ingreso del múltiple de escape en la interfaz CFD

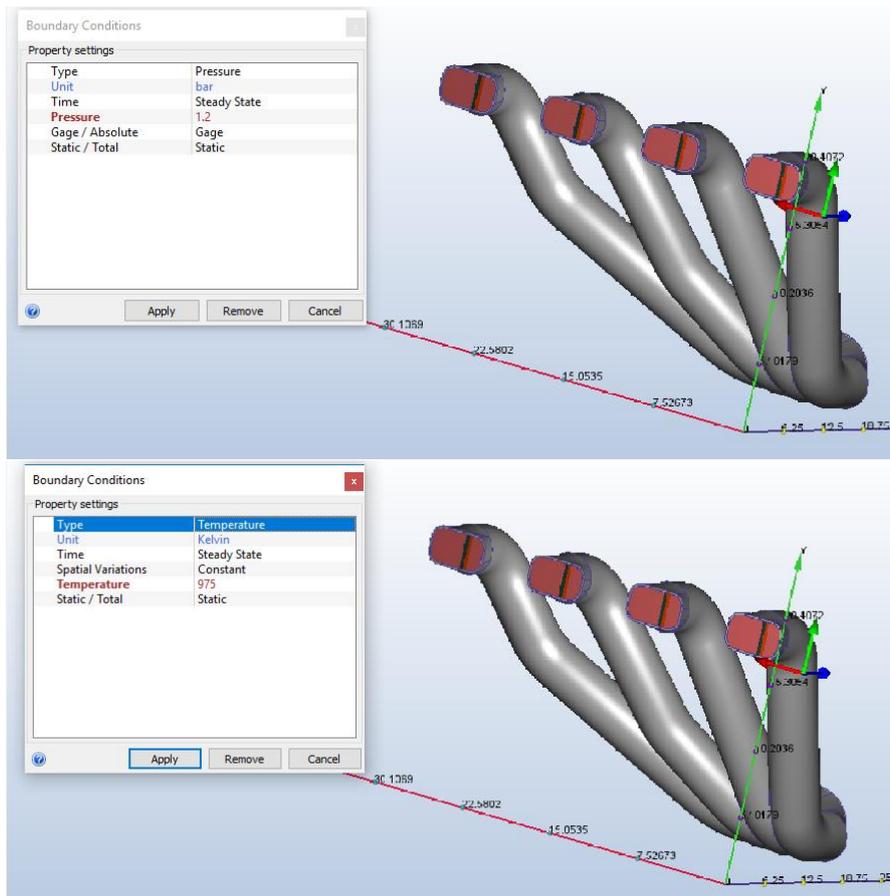


Figura 16. Condiciones de ingreso en estudio estático

**Análisis transitorio.**

En el análisis transitorio se definen los parámetros indicados en la tabla 6, 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 17.

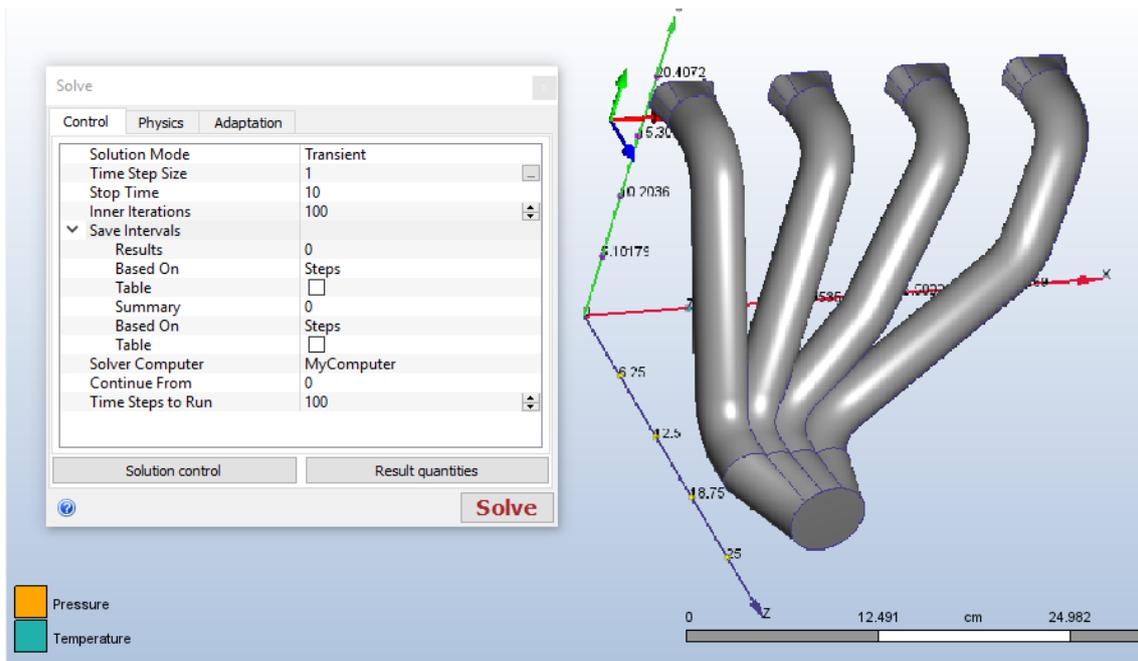


Figura 17. Simulación estado transitorio

Las condiciones seleccionadas para el control del *Solve* se presentan en la figura 18.

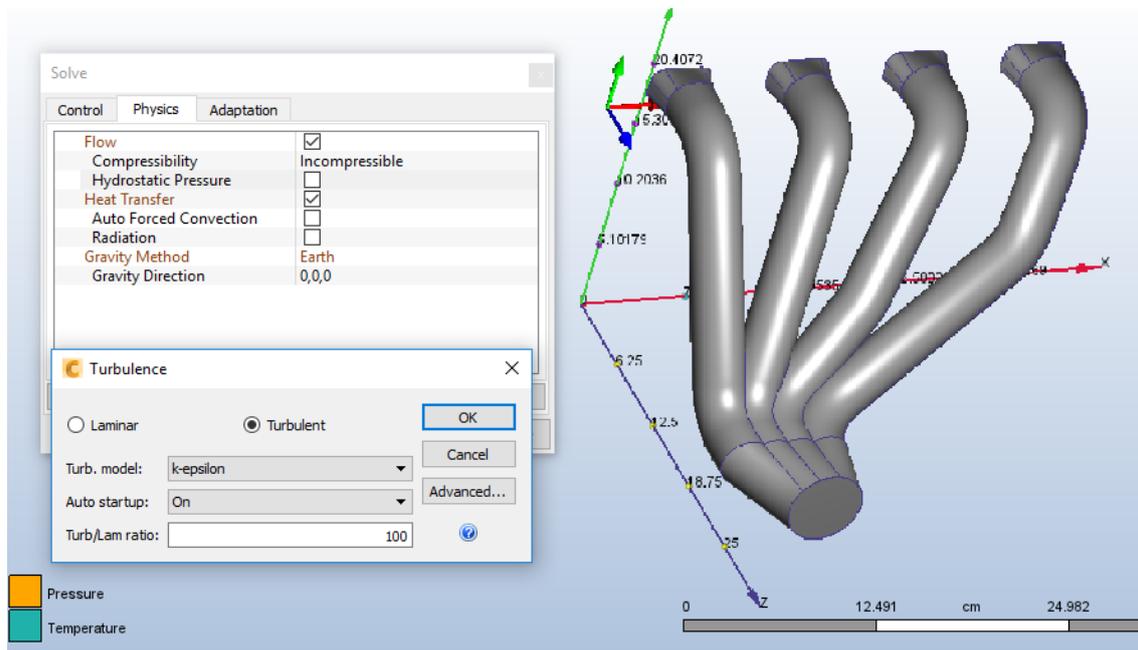


Figura 18. Condiciones para estado transitorio

Los resultados instantáneos que se obtendrán con OpenWAM, permitirán 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

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 diseño 1	$18.240 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-4}$
Configuración 4-1 diseño 2	$18.2882 \times 10^{-3}$	$1.44 \times 10^{-4}$

En la figura 19 se observa la ventana de ingreso de las condiciones del tipo de análisis y tiempo de estudio.

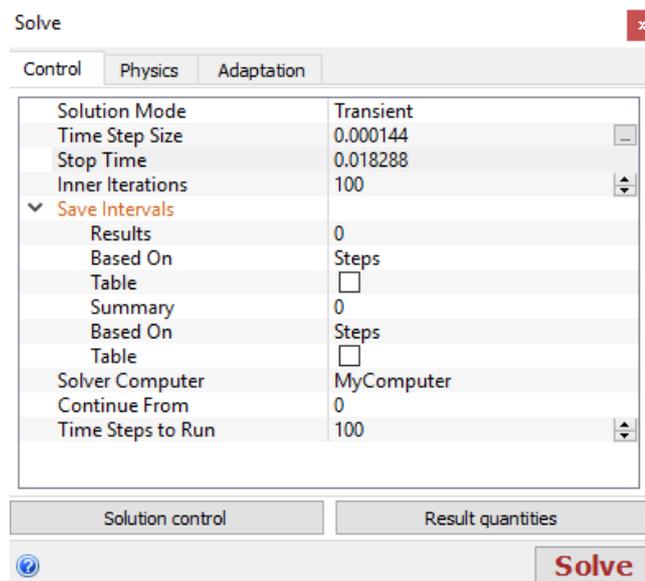


Figura 19. Ajustes del tipo de análisis

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 Autodesk CFD como funciones, permitiendo tener ingreso variable de flujo másico en función del tiempo. La condición a la salida se utilizó presión estática de 1.013 bar.

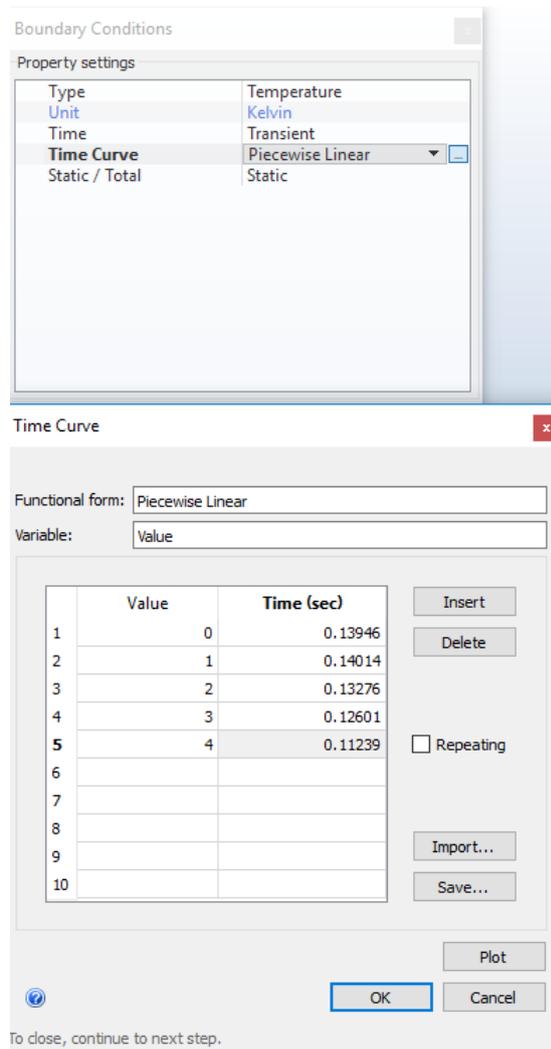
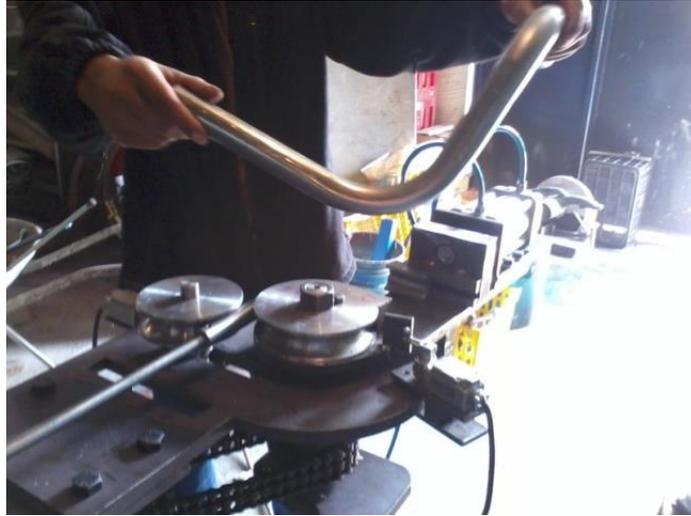


Figura 20. Condiciones de frontera en el ingreso del múltiple de escape

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 0.000228 s para la configuración 4-1.

### Construcción de Múltiple de Escape

La construcción del múltiple de escape se lo realizará por el método de doblado, este consiste en el doblado de los tubos, donde se observará un leve estrechamiento de la sección transversal en las curvaturas. Para este proceso se cortará los tubos de los diferentes materiales de la longitud especificada en el diseño y se doblará de acuerdo con los ángulos requeridos mediante una dobladora de tubos hidráulica, como se visualiza en la figura 21.



*Figura 21.* Roladora de tubos hidráulica

En la figura 22 se muestra un múltiple 4-1 fabricado en material aluminizado.



*Figura 22.* Múltiple 4-1 fabricado

El espesor de la tubería para la fabricación del múltiple de escape debe tener mínimo 0.9 mm, medidos en las partes donde no poseen dobladura, según indica la FIA (2017). Los múltiples se construirán en tubería circular de acero negro A500, acero inoxidable 904 y aluminizado de 1.5 mm de espesor.

### **Pruebas Dinamométricas**

Para determinar la potencia y torque experimentalmente, que servirá como validación a los

resultados de las curvas de torque y potencia de la simulación, se utilizará el dinamómetro de rodillos Powerdyno de marca MAHA modelo LPS 3000, desarrollando los ensayos a 2800 rpm y 73755 Pascales. Las especificaciones técnicas del banco dinamométrico se detallan a continuación:

El dinamómetro usado está conformado por los elementos que se detallan a continuación (Rosas & Barona, 2011):

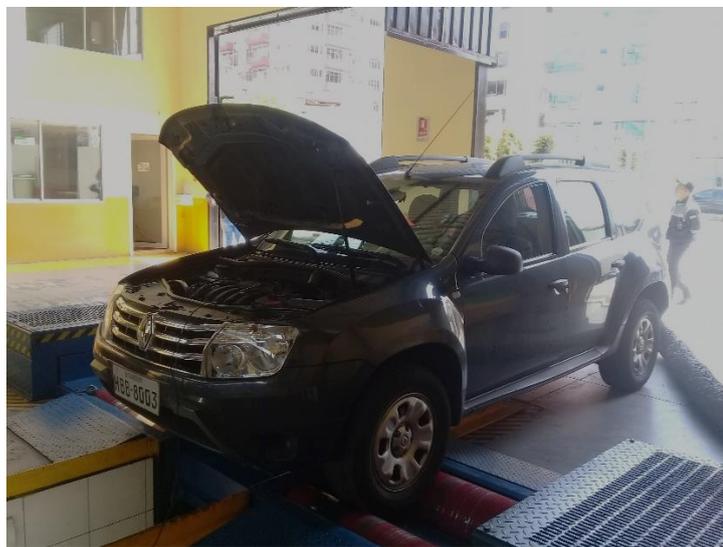
- Sistema de rodillos
- Freno para corrientes parásitas
- Chasis del dinamómetro
- Cardán
- Banco hidráulico
- Cilindros hidráulicos
- Sistema de refrigeración
- Sistema de recolección de datos

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

1. Verificar que la dimensión de las ruedas sea mínima a rin 13 pulgadas y que no exceda la capacidad de uso 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 que deben poseer entre las ruedas del vehículo y los rodillos del dinamómetro, haciéndolas girar hasta una velocidad de 20 km/h.

6. Garantizar la sujeción del vehículo con eslingas para impedir 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. La temperatura del motor debe alcanzar la temperatura normal de funcionamiento.
11. Encender el sistema de refrigeración del banco de pruebas LPS 3000.
12. Empezar la prueba de medición de campo.
13. Acelerar el vehículo manteniendo el pedal del acelerador a fondo en la marcha indicada en la prueba hasta alcanzar los rpm limite.
14. Cuando se alcanza los rpm limite 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 23 se observa el vehículo de pruebas en el dinamómetro de chasis LPS 3000.



*Figura 23.* 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 convertirán 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 5.

$$\alpha_a = \left(\frac{99}{P_p}\right)^{1.2} * \left(\frac{T_p}{298}\right)^{0.5} \quad (5)$$

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 4-1, cuyas dimensiones se presentan en la tabla 16, detalladas por las longitudes de cada ducto. 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 referenciales iniciales para múltiple de escape.

Dimensiones	Original 4-1	Gillieri	Heisler
	mm		
Longitud de colector	L1: 200		
	L2: 260	688.33	796.92
	L3: 290		
	L4: 350		
Diámetro interno del colector	35.1	35.97	35.1
Diámetro al final del colector	41	46.23	47.5

### Simulación 1D

Una vez concluido el proceso de simulación (figura 24), 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 Statgraphics 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.

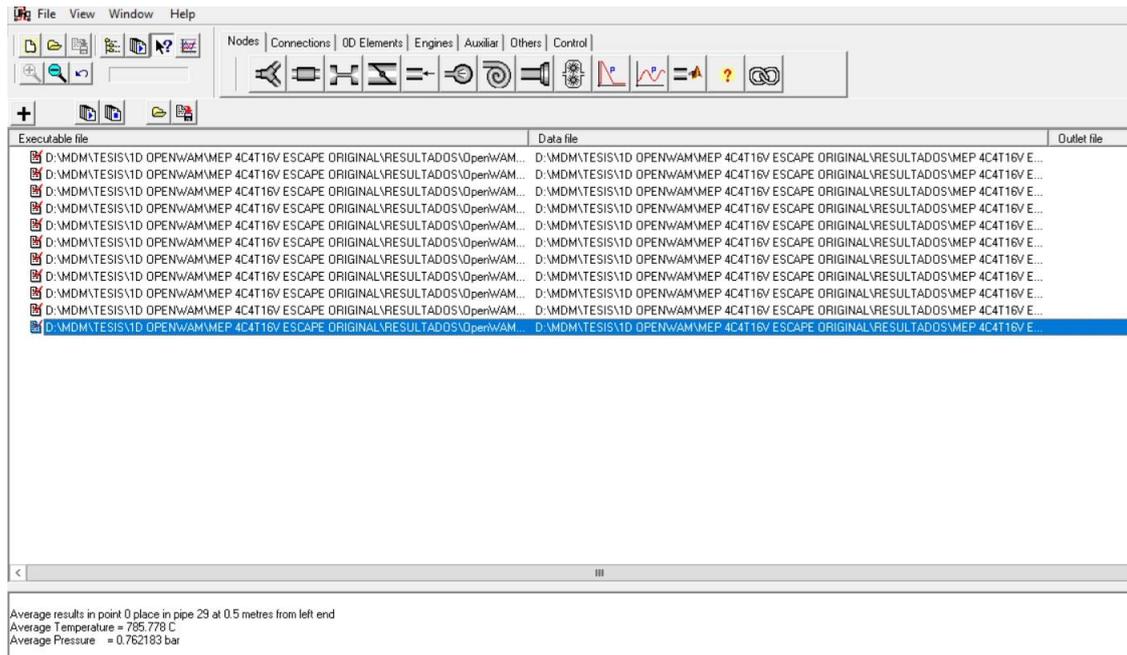


Figura 24. Finalización del proceso de simulación en OpenWAM

**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>
2000	25.50	121.78
2500	31.69	121.02
3000	40.38	128.47
3500	47.66	130.04
4000	54.71	130.66
4500	57.26	121.50
5000	61.07	116.61
5500	62.69	108.83
5800	62.67	103.04

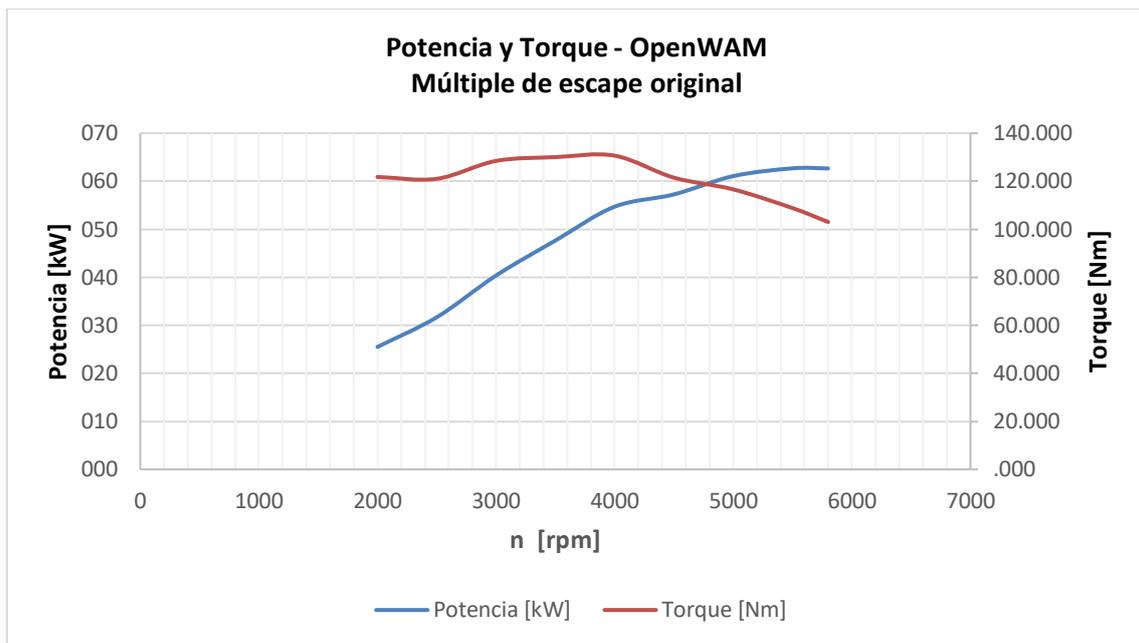


Figura 25. Curvas de potencia y torque para múltiple original

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

En la tabla 17 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 17.

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

n [rpm]	Longitud del colector [mm]								
	420	450	500	550	600	650	700	750	800
4000	54.42	54.66	54.66	54.55	55.41	55.98	56.18	55.12	55.58
4500	56.64	56.57	56.79	57.67	57.83	56.91	56.87	56.80	57.09
5000	60.76	59.13	58.55	59.45	58.97	58.70	59.11	59.29	59.64
5500	62.72	61.71	61.91	62.84	62.59	62.19	62.80	61.44	63.13
5800	63.03	65.01	63.11	64.65	64.55	65.80	64.30	64.90	64.26

Nota: Los resultados de potencia se muestran en kW.

Por restricciones de espacio para no modificar el sistema de escape del vehículo se selecciona la longitud de colector de 420 mm. Los resultados de torque y potencia para esta dimensión se detallan en la tabla 18 y la figura 26.

Tabla 18.

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

n [rpm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
2000	25.53	121.92
2500	31.32	119.55
3000	40.09	127.62
3500	47.45	129.47
4000	54.42	129.85
4500	56.64	120.26
5000	60.76	116.64
5500	62.72	108.87
5800	63.03	104.29

Nota: Longitud del colector 420 mm

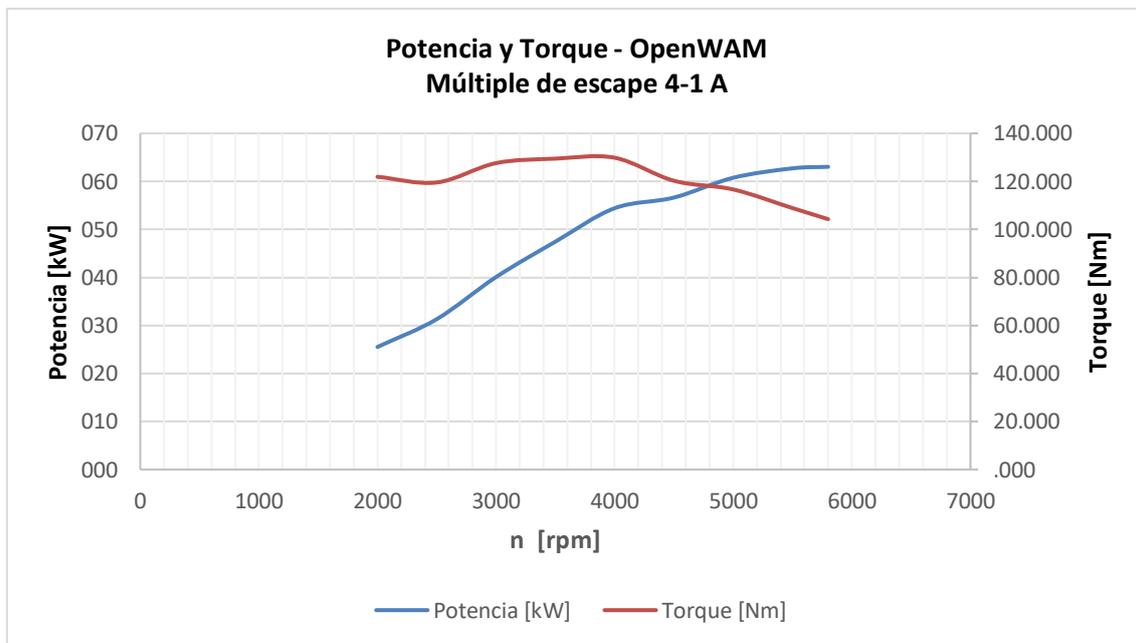


Figura 26. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-1 A

Con el colector de longitud 650 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 19 y la figura 27.

Tabla 19.

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

n [rpm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
2500	26.50	126.57
3500	32.66	125.24
4500	41.62	132.48
5500	49.48	135.64
6000	55.98	134.80
6500	56.91	125.99
7000	58.70	120.51
7500	62.19	114.06
7800	65.80	107.75

Nota: Longitud de colector 650 mm.

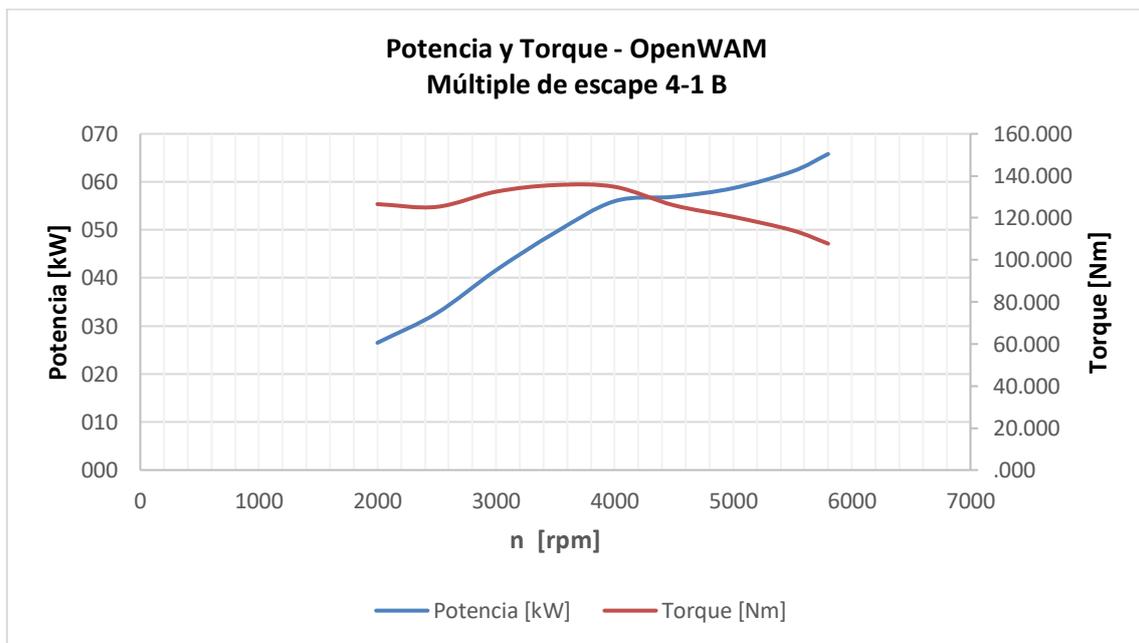


Figura 27. Curvas de potencia y torque para múltiple de escape 4-1 B

### 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 28 se muestra el modelo 3D del múltiple de escape original y el volumen interno correspondiente al dominio para el análisis CFD.

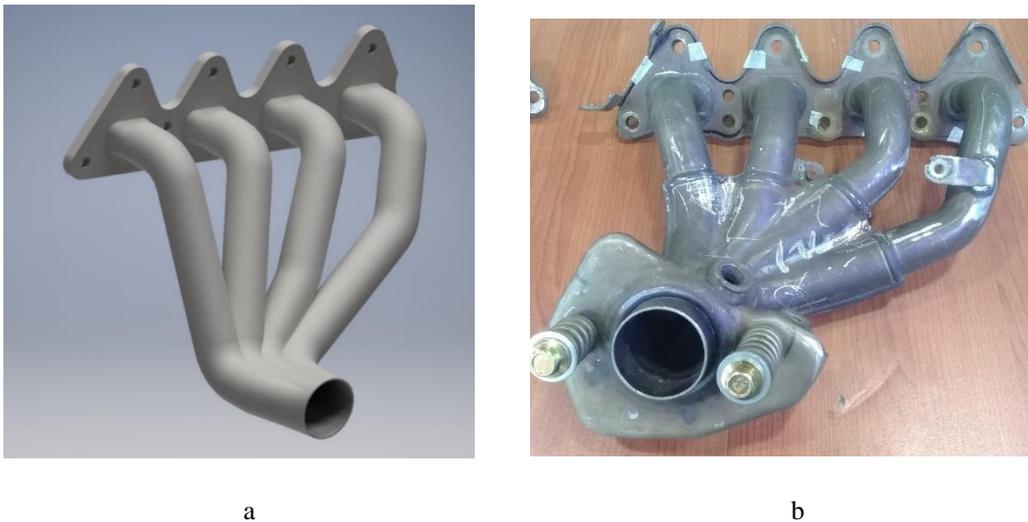


Figura 28. Múltiple de escape original: (a) modelado 3D, (b) real

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

En la figura 29 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 420 mm y diámetro interno de 35 mm.



Figura 29. Múltiple de escape 4-1: (a) modelado 3D, (b) real

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

En la figura 30 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 650 mm y diámetro interno de 35 mm.

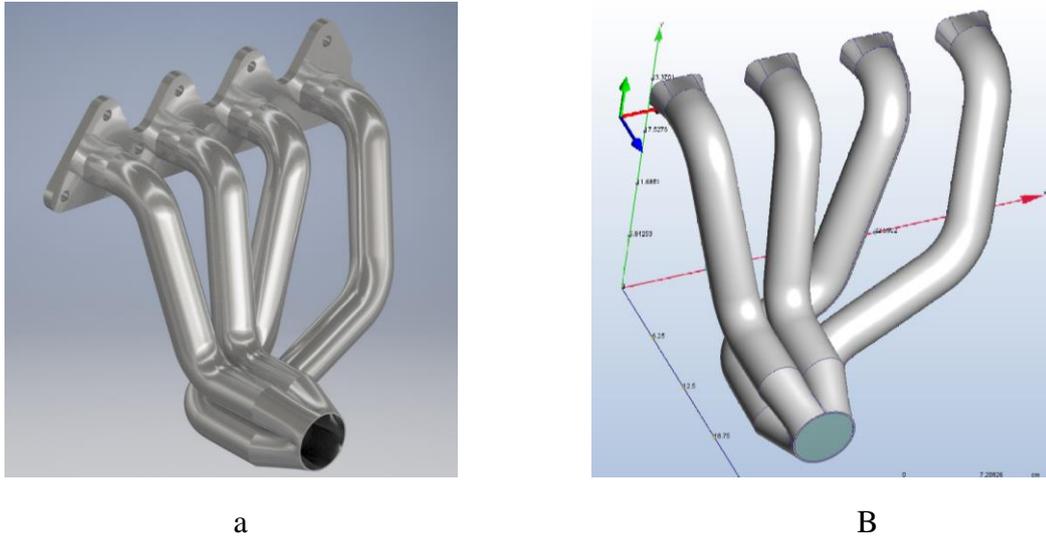


Figura 30. Múltiple de escape 4-1: (a) modelado 3D, (b) volumen interno

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

En el caso del flujo en el múltiple de escape original se tiene una malla con 190101 nodos, 756251 elementos y un valor de 0.2432 para el factor *Skewness* que indica una elevada calidad de mallado, como se observa en la figura 31.

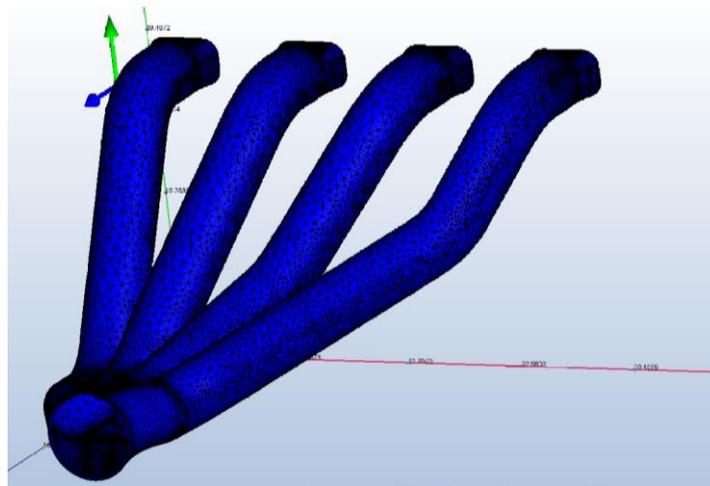


Figura 31. Mallado del dominio en el múltiple de escape original

***Múltiple de escape configuración 4-1 longitud 420 mm***

La malla del múltiple de escape 4-1, mostrada en la figura 32, posee 319719 nodos, 1317162 elementos y un factor *Skewness* de 0.2432.

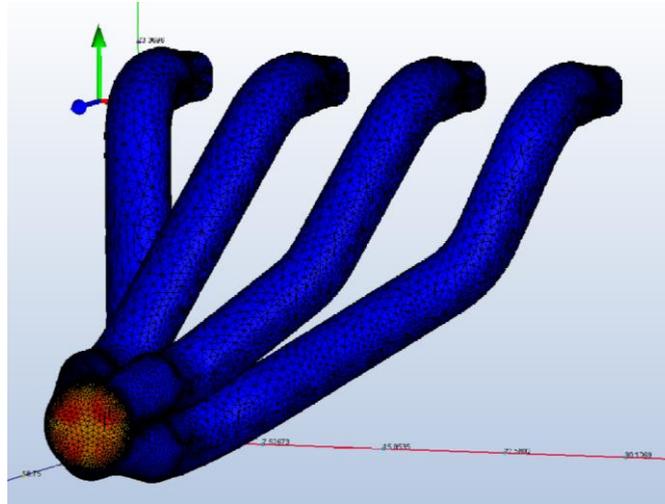


Figura 32. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1

***Múltiple de escape configuración 4-1 longitud 650 mm***

El mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1 contiene 320 628 nodos, 1385990 elementos y un factor *Skewness* de 0.21394, presentando una buena calidad de malla, como se indica en la figura 33.

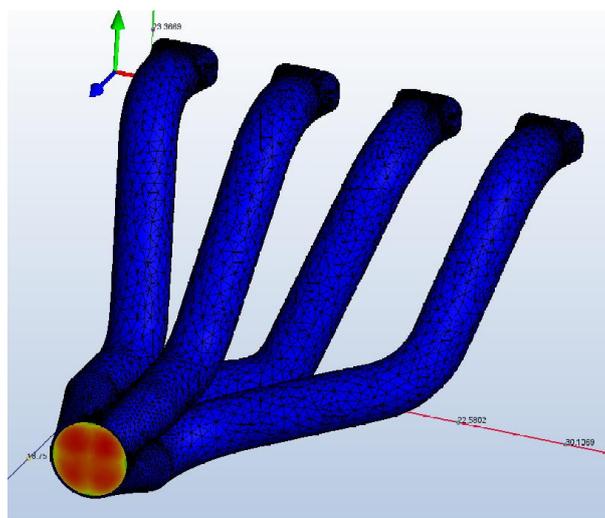


Figura 33. Mallado del dominio en el múltiple de escape 4-1

### CFD-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 K4M.

### Análisis Transitorio.

#### Múltiple de escape original.

La figura 34 presenta los resultados de velocidad y de presión obtenidos en el múltiple de escape original de acuerdo con el análisis estático. La velocidad promedio en la entrada del múltiple es de 85 m/s, alcanzando un valor máximo de 155 m/s en la zona de unión de los colectores secundarios. La presión promedio de las cuatro entradas es de 120 KPa, y una presión a la salida de 103 KPa.

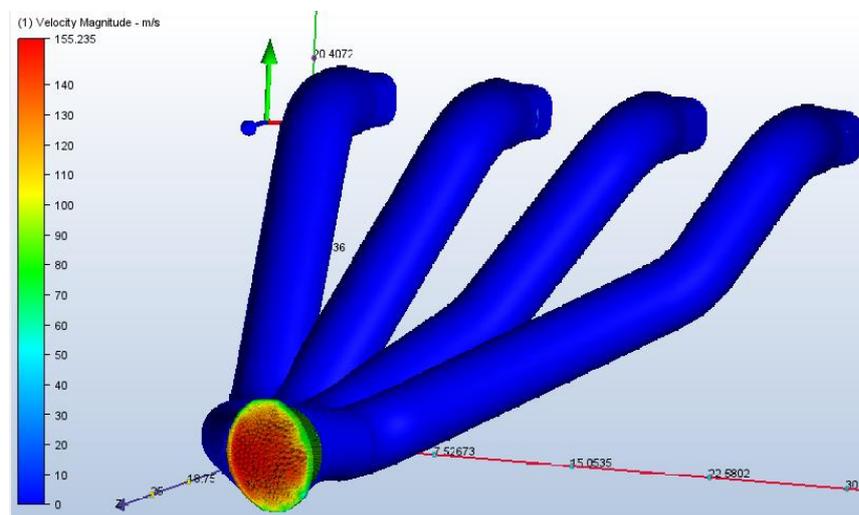


Figura 34. Resultados de la simulación

Como se aprecia en la figura 35 y 36, donde se realiza un corte en la sección transversal del múltiple para poder visualizar el comportamiento del fluido dentro de los colectores, la velocidad llega a su punto máximo en la salida del colector en cambio la presión es mayor en

la entrada del colector y disminuye a su salida.

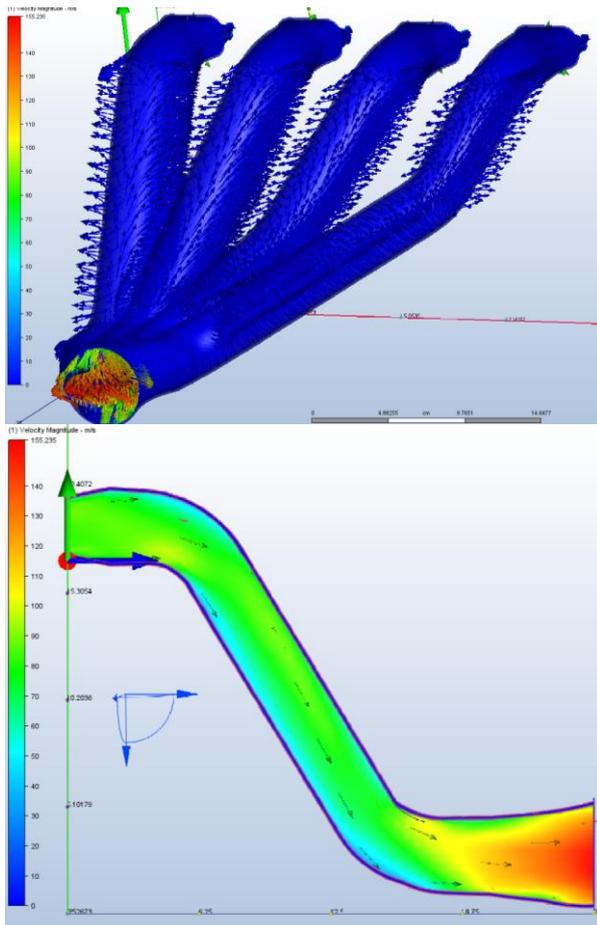


Figura 35. Resultados de la velocidad múltiple original

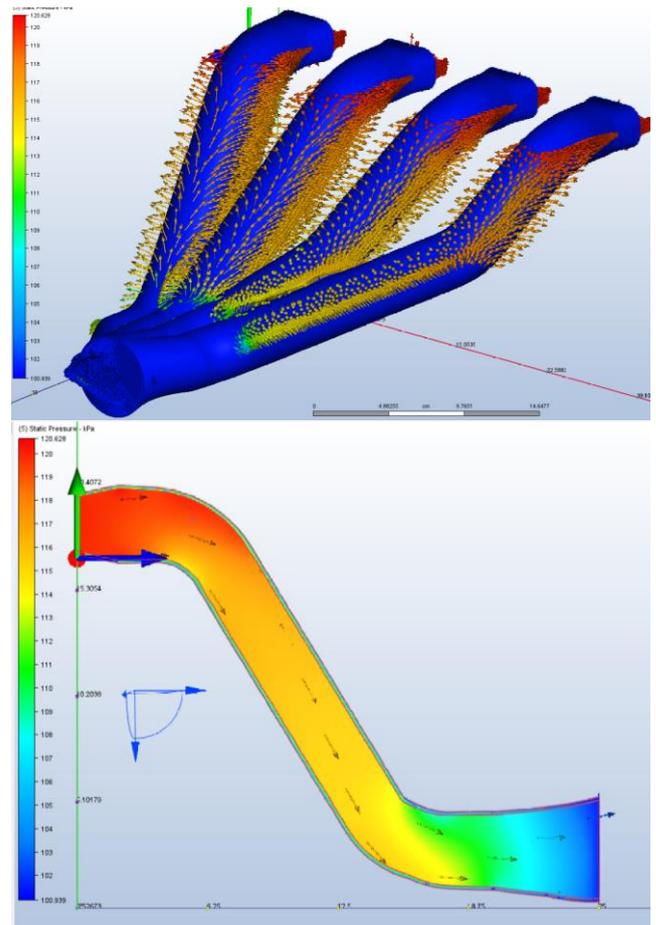


Figura 36. Resultados de la presión múltiple original

### Múltiple de escape 4-1.

La figura 37 y 38 presenta los resultados de velocidad y de presión obtenidos en el múltiple de escape fabricado de acuerdo al análisis estático. La velocidad promedio en la entrada del múltiple es de 87 m/s, alcanzando un valor máximo de 167 m/s en la zona de unión de los colectores secundarios. La presión promedio de las cuatro entradas es de 120 KPa, y una presión a la salida de 101 KPa.

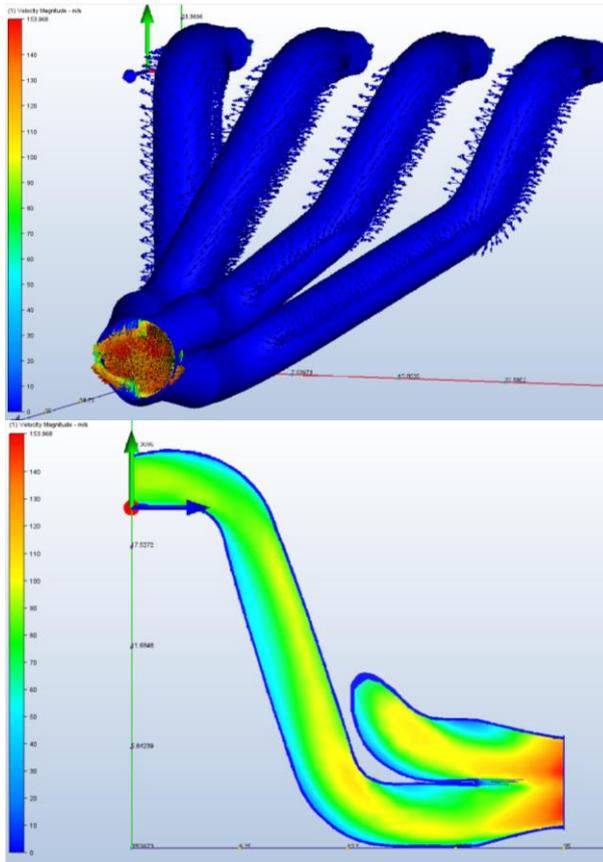


Figura 37. Resultados de la velocidad en el múltiple fabricado

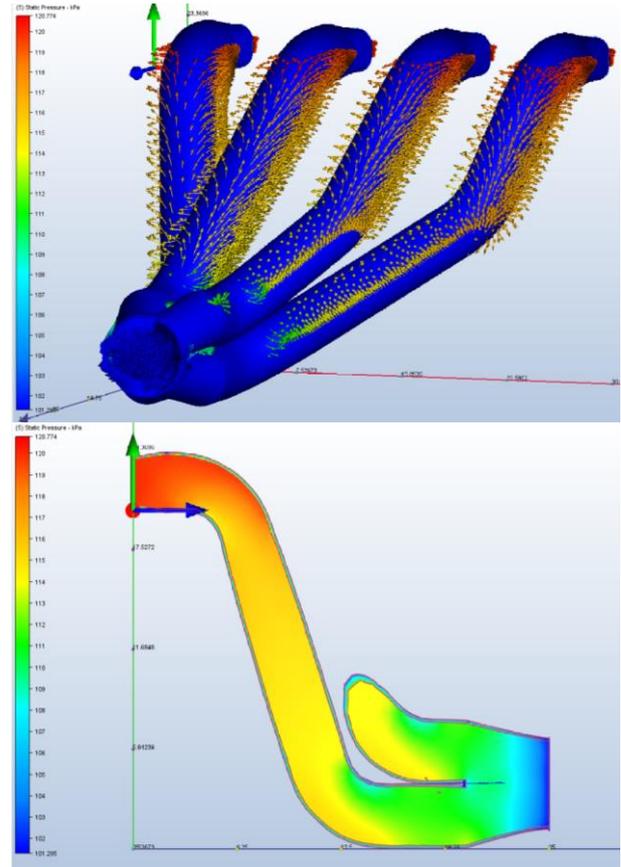


Figura 38. Resultados de la Presión en el múltiple fabricado

### Pruebas Dinamométricas

Luego de realizar tres 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 figura 39 se presenta las curvas de potencia, correspondientes a las tres pruebas realizadas en el dinamómetro.

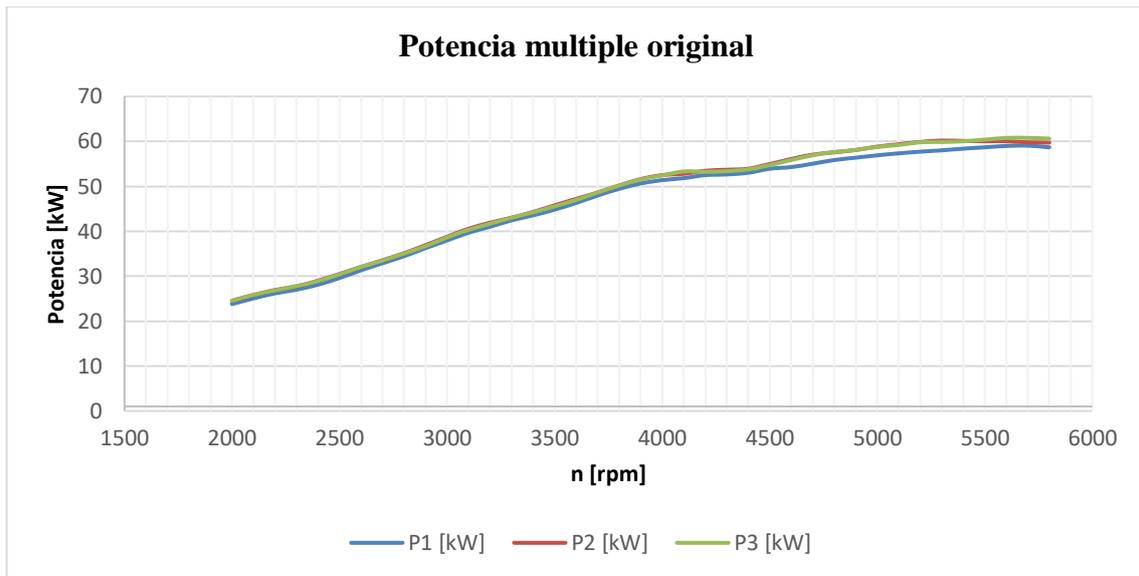


Figura 39. Curvas de potencia con múltiple de escape original

### Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, acero negro.

Las curvas de potencia obtenidas luego de tres mediciones con el múltiple de escape 4-1 de acero negro se presentan en la figura 40.

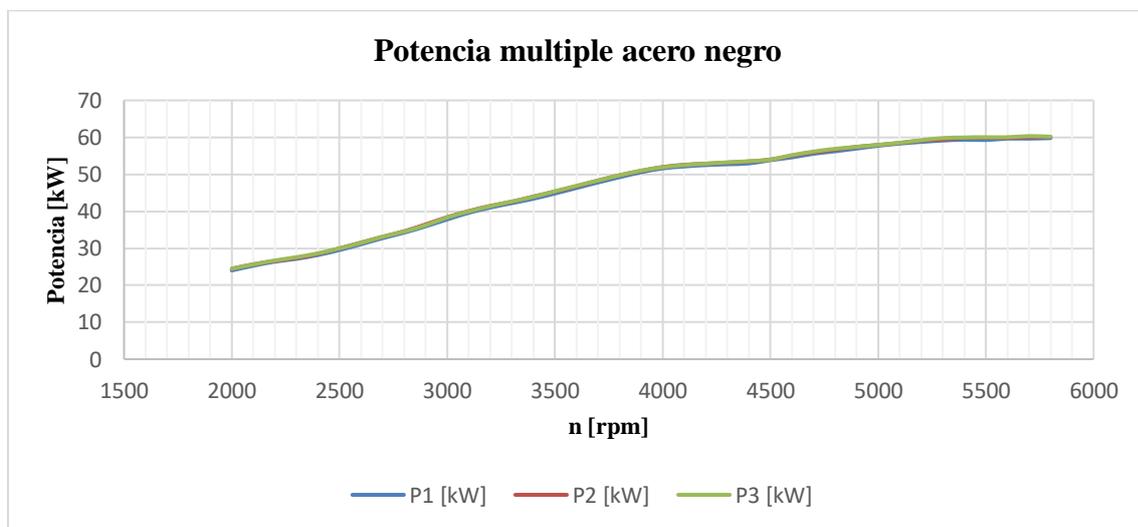


Figura 40. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, material acero negro

### Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, material acero inoxidable.

En la figura 41 se muestran los resultados de potencia al utilizar el

múltiple de escape 4-1 de acero inoxidable.

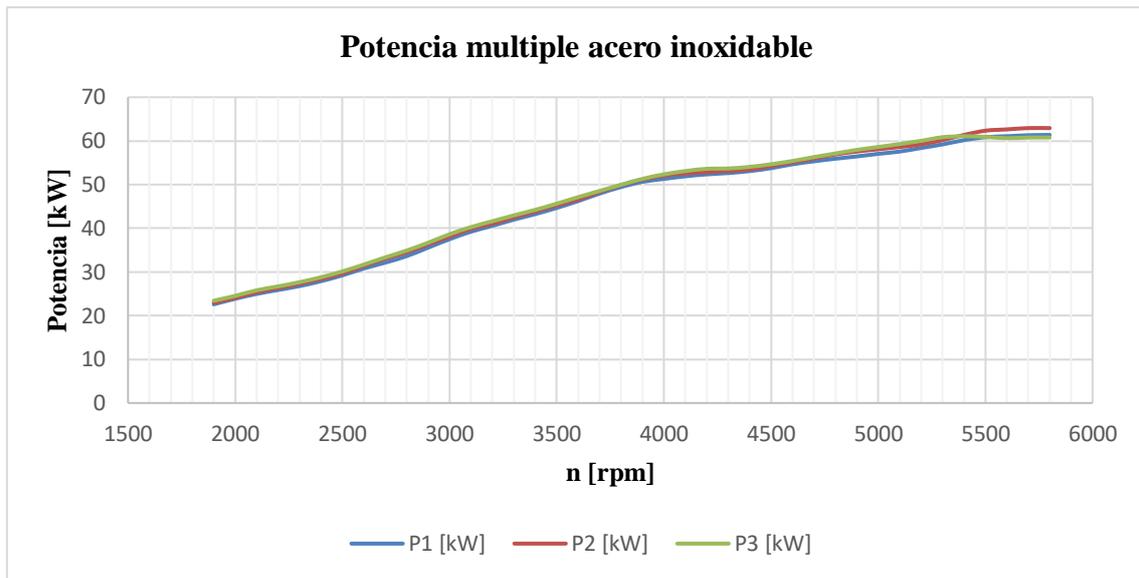


Figura 41. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, acero inoxidable

### Obtención de potencia con múltiple de escape configuración 4-1, material aluminizado.

En la figura 56 se muestran los resultados de potencia al utilizar el múltiple de escape 4-1 en material aluminizado.

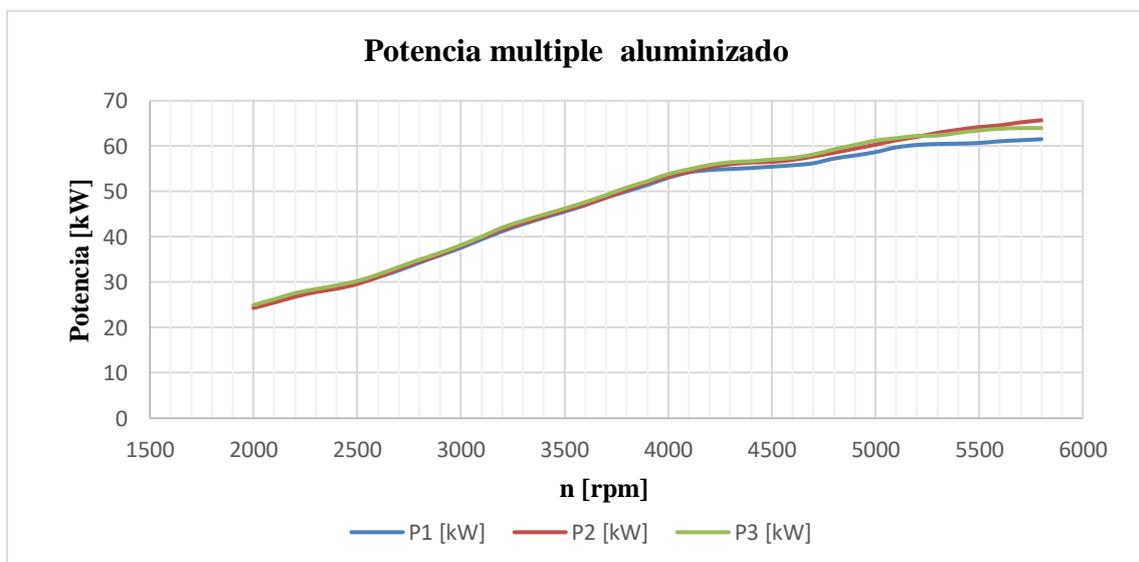


Figura 42. Curvas de potencia con múltiple de escape 4-1, aluminizado

Los valores y curvas obtenidas luego de los tres 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 tres pruebas realizadas en el dinamómetro al vehículo con múltiple de escape original, se obtuvo las curvas de torque de la figura 43.

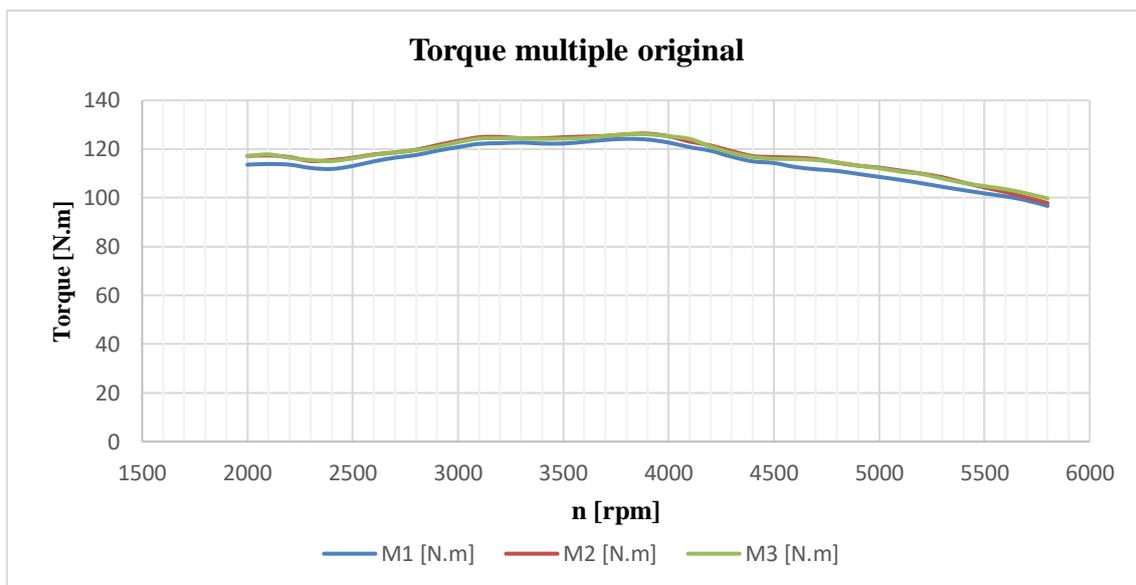


Figura 43. Curvas de torque con múltiple de escape original

### **Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, material acero negro.**

En la figura 44, se presentan los resultados de torque luego de tres pruebas consecutivas en el vehículo Duster al usar el múltiple de escape configuración 4-1 y de material acero negro, tubos doblados. Las curvas generadas no muestran mayor diferencia entre sí.

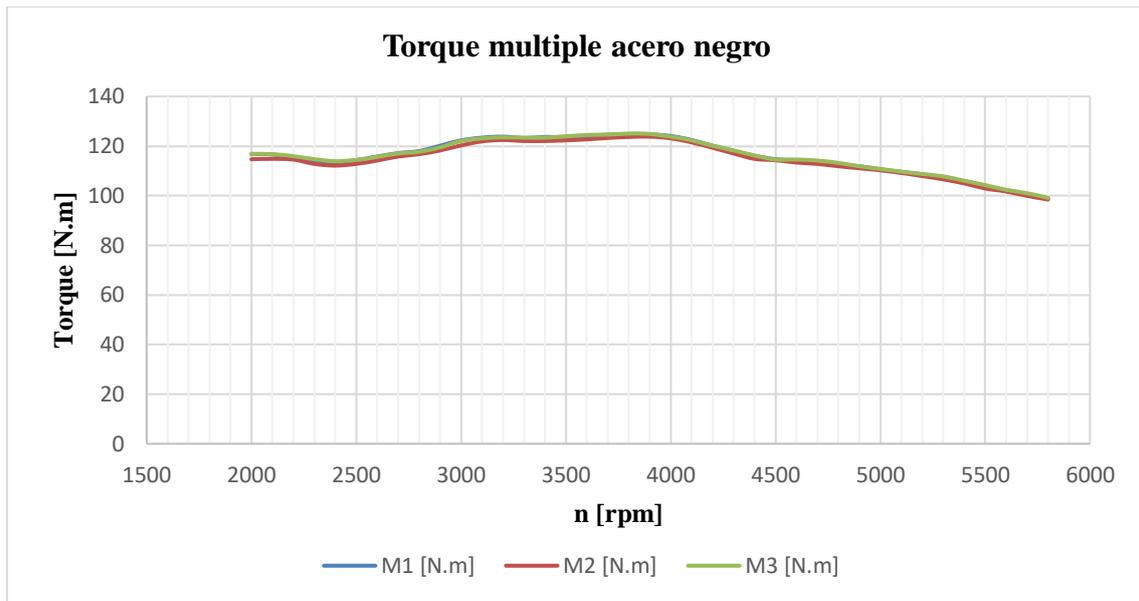


Figura 44. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, material acero negro

### **Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, material acero inoxidable**

Los resultados de torque luego de tres pruebas consecutivas al usar el múltiple de escape configuración 4-1 y material acero inoxidable, se muestran figura 45, observando una mínima diferencia entre las curvas generadas.

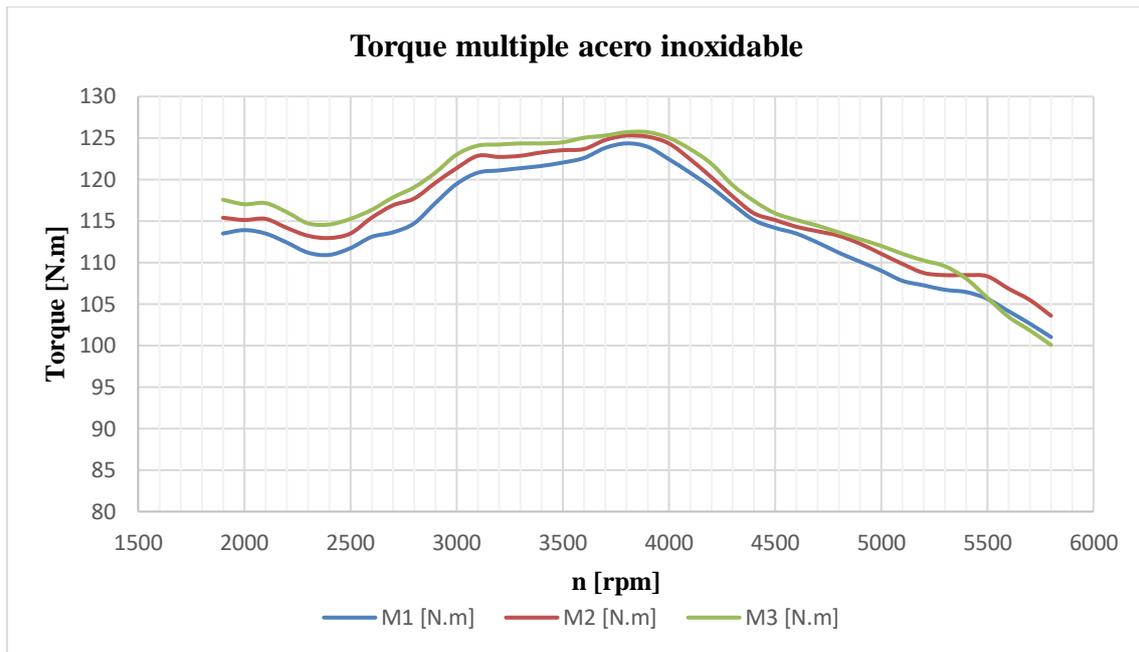


Figura 45. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, material acero inoxidable

#### Obtención de torque con múltiple de escape configuración 4-1, material aluminizado

Los resultados de torque luego de tres pruebas consecutivas al usar el múltiple de escape configuración 4-1 y material aluminizado, se muestran figura 46, observando una mínima diferencia entre las curvas generadas.

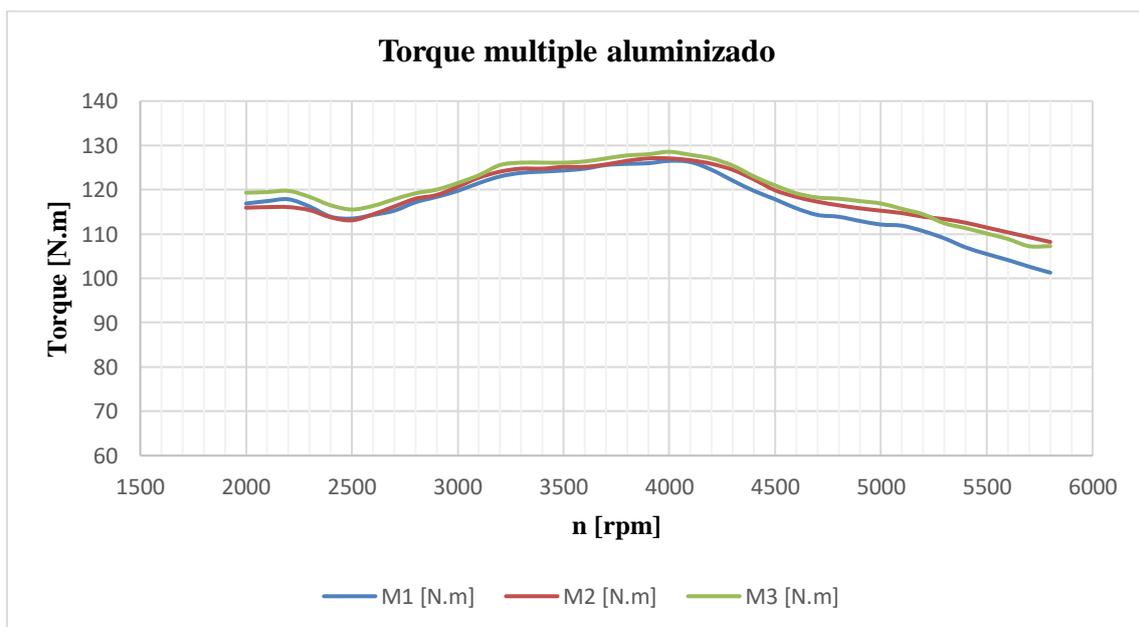


Figura 46. Curvas de torque con múltiple de escape 4-1, material aluminizado

## Análisis y Discusión de Resultados

### Análisis de los Cálculos Introdutorios

Las longitudes calculadas mediante las relaciones de Gillieri (2007) tienen un amplio rango de diferencia con respecto las dimensiones del múltiple original, por lo cual fue necesario analizar con longitudes de colector entre 420 a 800 mm en el programa OpenWAM para encontrar la longitud que mejore el desempeño del motor.

### Simulación 1D

Los resultados obtenidos de la simulación con OpenWAM permiten desarrollar un análisis estadístico para observar los parámetros más influyentes en la potencia y torque 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 encontrar el rango de longitudes para colectores en configuración 4-1, donde se alcanza mayor potencia de motor.

**Tabla 20.**

Tabla estadística de valoración de potencia al variar la longitud del colector de 420 a 800 mm

n [rpm]	Longitud de colector [mm]								
	420	450	500	550	600	650	700	750	800
Valor mínimo	55.35	55.24	55.24	55.12	56.00	56.57	56.77	56.28	56.16
Mediana	61.51	61.00	61.11	60.70	59.59	59.94	60.35	59.91	60.27
Valor máximo	64.65	65.69	63.87	65.33	65.23	66.49	64.97	65.59	64.93
Desviación estándar	4.16	4.24	3.67	4.01	3.78	4.28	3.60	3.72	3.60
Rango	9.30	10.45	8.63	10.20	9.24	9.92	8.20	9.31	8.77
Promedio	60.55	60.53	60.51	60.52	60.57	60.68	60.60	60.50	60.50

*Nota: Valores máximo a 5750 rpm*

La figura 60 presenta los valores máximos de potencia para las longitudes de colector entre 420 y 800 mm.

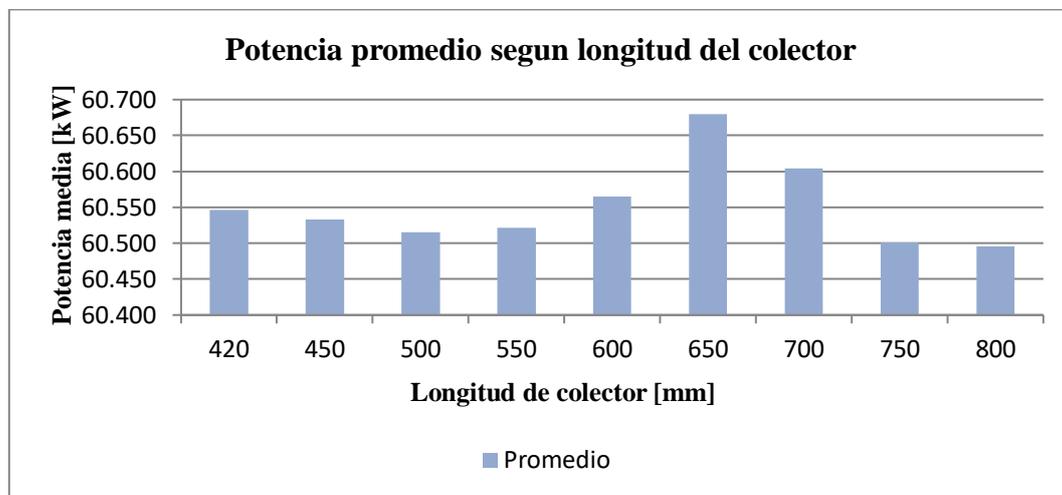


Figura 47. Comparación de potencia para longitudes entre 420 a 800 mm, cada 50 mm

Se establece entonces que para las características del motor K4M se alcanza mayor potencia del motor al usar colectores de 650 mm de longitud en un múltiple de escape 4-1, concuerdan con el estudio realizado por Arroyo (2017), donde al realizar la simulación con un motor G13B logra obtener un crecimiento progresivo de potencia con un colector de 775 mm

#### **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 con la longitud que alcanzan mayor rendimiento la longitud igual a la original. Para la configuración 4-1 A se utilizó, el colector de 420 mm de longitud. Y para la configuración 4-1 B se utilizó el colector de 650 mm.

Se elaboró una tabla estadística que permitió trabajar con los valores máximos de potencia y torque, puesto que en esta investigación se busca mejorar este valor. Como se presenta en la tabla 21.

Tabla 21.

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

n [rpm]	Múltiple Original		Configuración 4-1 A L=420 mm		Configuración 4-1 B L=650 mm	
	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
2500	31.69	124.48	31.92	121.83	32.66	127.52
3000	41.34	129.70	41.62	130.05	42.76	139.77
3500	47.20	132.52	47.90	134.40	50.16	138.10
4000	55.75	132.52	55.35	131.09	55.98	138.51
4500	57.43	123.81	57.12	123.70	56.91	131.72
5000	62.12	119.94	61.51	118.30	58.70	119.40
5500	63.53	109.86	64.09	109.91	62.19	118.21
5800	63.62	105.00	64.65	104.78	65.80	111.70
Valor mínimo	31.69	105.00	31.92	104.78	32.66	111.70
Cuartil 1	42.80	112.38	43.19	112.01	44.61	118.50
Mediana	56.59	124.15	56.24	122.76	56.44	129.62
Cuartil 3	63.18	131.81	63.45	130.83	61.32	138.41
Valor máximo	63.62	132.52	64.65	134.40	65.80	139.77
Desviación estándar	11.70	10.21	11.67	10.42	10.90	10.69
Rango	31.94	27.53	32.74	29.62	33.13	28.07
Promedio	52.83	122.23	53.02	121.76	53.14	128.12

Se establece entonces, que las configuraciones 4-1 A y 4-1 B permite alcanzar mejores resultados de torque y potencia de motor en los rangos de altas revoluciones, mientras que la configuración 4-1 original en velocidades de giro medias. En el estudio de Arroyo (2017) con la dimensión de colector que dio mayor rendimiento al motor se analizó en todo el rango de revoluciones, dando mejores resultados a altas revoluciones.

A pesar de que la configuración 4-1 B alcanza el máximo valor de torque y potencia se escogió la longitud de 420 por el espacio que se tiene para el montaje del múltiple, ya que no se pretende modificar el sistema original de escape.

En la figura 48 se presenta los porcentajes de incremento de potencia al modificar la

configuración y longitud del múltiple de escape, en relación con el sistema original.

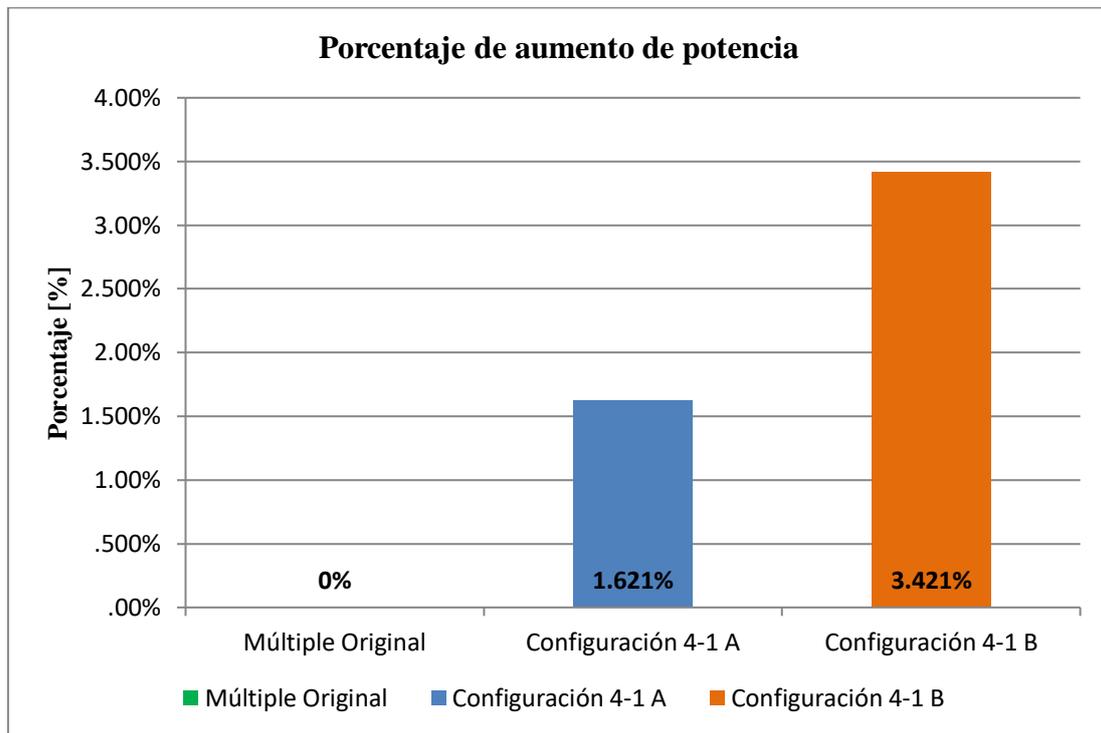


Figura 48. Porcentaje de variación de potencia máxima según configuración de múltiple

Existe un aumento de potencia máxima de 1.62 % con las longitudes apropiadas en la configuración 4-1 A, mientras que se incrementa un 3.42 % usando la configuración 4-1 B, respecto al múltiple original, en la investigación de Arroyo (2017) se tiene un incremento del 10.10 % al simular con un múltiple de configuración 4-1, lo que ratifica un aumento de potencia al utilizar este tipo de configuración en el múltiple de escape.

Los porcentajes de variación de torque máximo según el tipo de configuración respecto al múltiple original se indican en la figura 49.

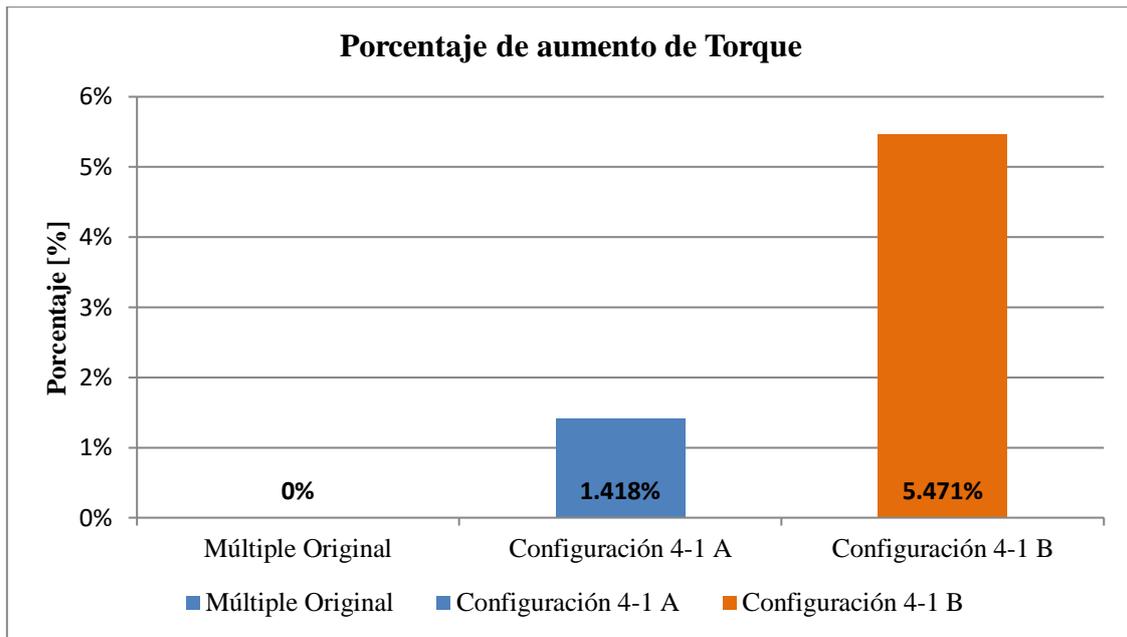


Figura 49. Porcentaje de variación de torque máximo según configuración de múltiple

De acuerdo con los datos analizados el incremento de torque máximo es mayor para la configuración 4-1 B longitud 675 mm, con un 5.47% respecto al original y la configuración 4-1 A longitud 420 mm presenta un incremento del 1.41% de incremento respecto al original, en las simulaciones que realiza Arroyo (2017), al cambiar a una configuración 4-1 se obtiene un aumento de la potencia de 3.26%, lo que ratifica una mejora de torque en los motores.

### Simulación 3D

Para el análisis de resultados de la simulación computacional tridimensional se considera la velocidad y presión del fluido en el múltiple 4-1 con diferentes materiales, 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 múltiple, utilizando los valores maximos

promedio. En la tabla 22 se muestran los valores en la entrada de los colectores correspondientes para cada diseño.

Tabla 22.

Tabla estadística de los parámetros en la entrada del múltiple

Valores	Original		Configuración Acero negro		Configuración acero inoxidable		Configuración Aluminizado	
	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]
Cilindro 1	37.4581	120465	38.0153	120374	38.4251	120235	38.7841	120122
Cilindro 2	38.1689	120355	38.1221	120312	38.9258	120280	39.0214	120195
Cilindro 3	38.3736	120320	39.2412	120266	39.8541	120198	39.9625	120084
Cilindro 4	38.6388	121231	39.2541	120141	40.124	120032	40.8542	120002
Valor mínimo	37.46	120320.00	38.02	120141.00	38.43	120032.00	38.78	120002.00
Mediana	38.27	120410.00	38.68	120289.00	39.39	120216.50	39.49	120103.00
Valor máximo	38.64	121231.00	39.25	120374.00	40.12	120280.00	40.85	120195.00
Desviación estándar	0.51	429.96	0.68	98.65	0.79	108.16	0.95	80.35
Rango	1.18	911.00	1.24	233.00	1.70	248.00	2.07	193.00
Promedio	38.16	120592.75	38.66	120273.25	39.33	120186.25	39.66	120100.75

La figura 50 indica los porcentajes de aumento de velocidad en el ingreso del múltiple de escape con los diseños propuestos, en relación al colector original.

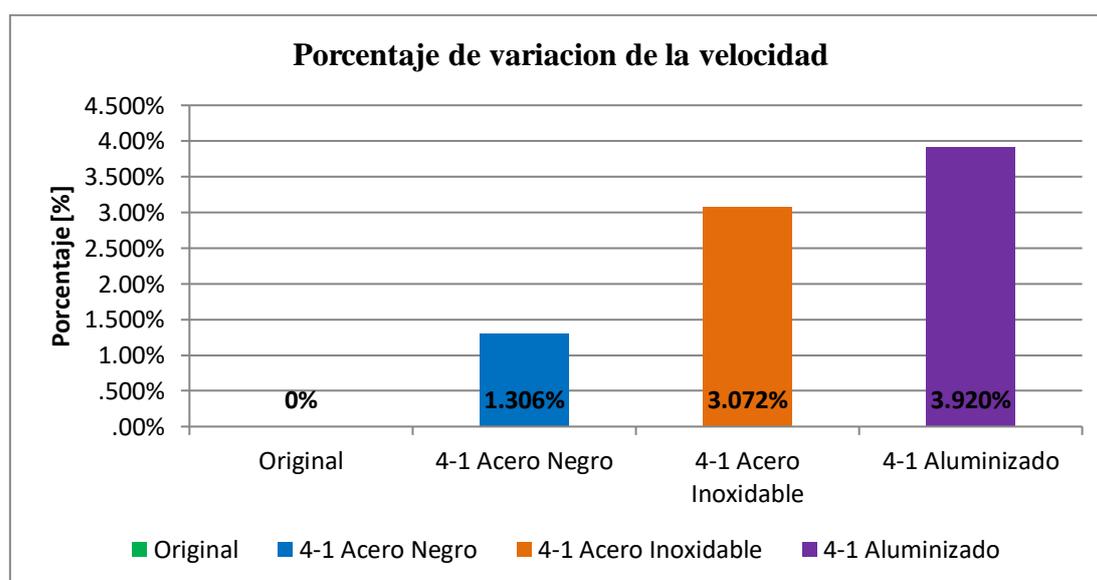


Figura 50. Porcentaje de variación de velocidad de entrada

Se establece que existe un incremento de velocidad en la entrada del múltiple de escape entre 1.31 % y 3.92 % para los diseños propuestos, con respecto al modelo original. En la investigación de Bisane y Kaptapal (2014) en el cual se diseña un sistema de escape mediante la simulación de fluidos en la cual ingresaron como condiciones de contorno presión flujo másico y temperatura se obtiene un aumento de velocidad en el múltiple de escape de 0.29 %

La figura 51 muestra los porcentajes de variación de presión en la entrada del colector, con respecto al original.

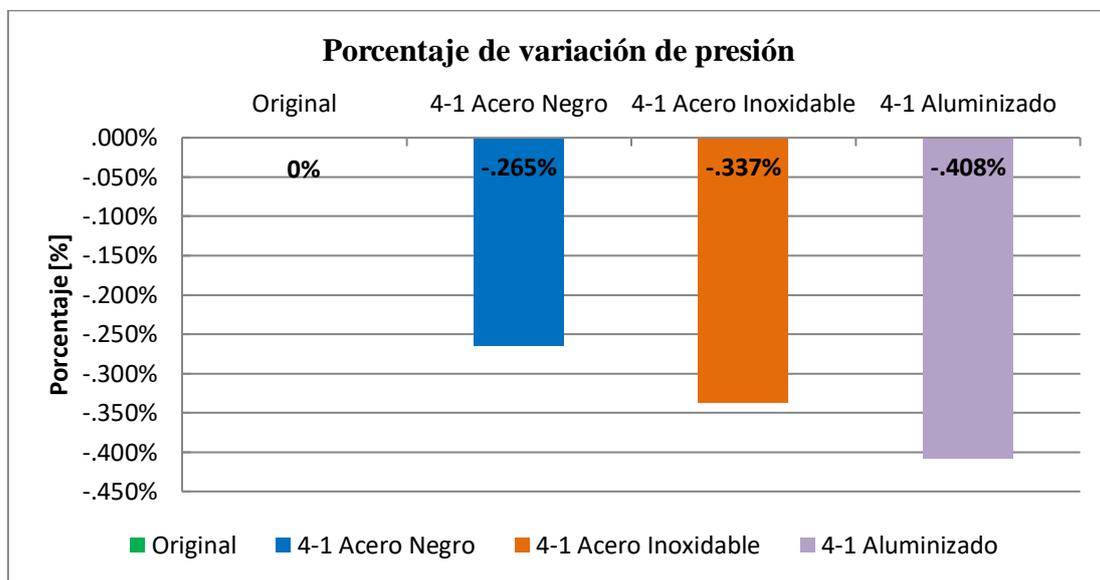


Figura 51. Porcentaje de variación de presión de entrada

Según los resultados del análisis estático la variación de presión en la entrada es mínima de tal solo de -0.41% en relación al múltiple original, con el material aluminizado.

### Pruebas Dinamométricas

En la figura 52 se observa la comparación de las curvas características de potencia obtenidas en las pruebas dinamométricas con cada múltiple de escape.

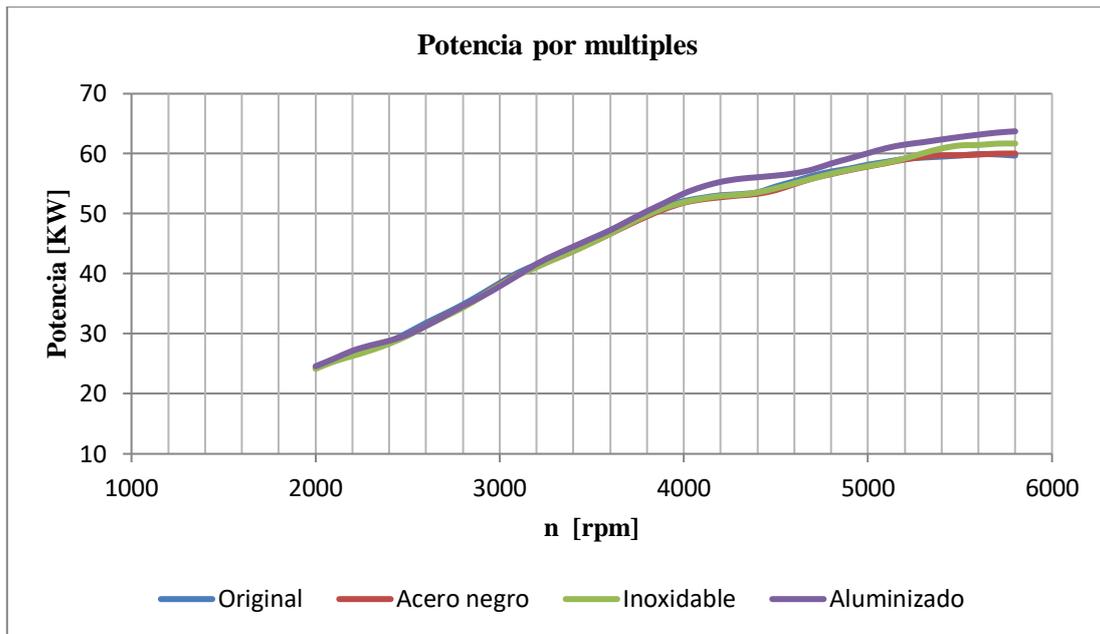


Figura 52. Comparación de curvas de potencia

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

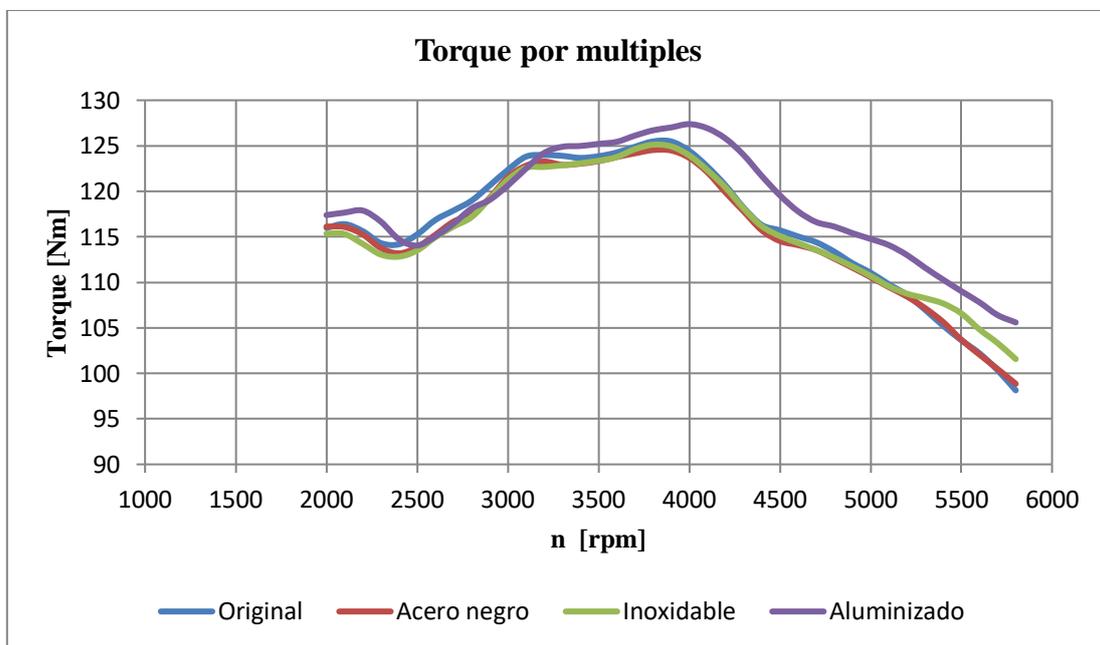


Figura 53. Comparación de curvas de torque

La tabla 23 consiste en una tabla estadística del comportamiento del vehículo Renault Duster usando el múltiple original y la configuración 4-1 A con diferentes materiales

Tabla 23.

Tabla estadística de potencia y torque medidos

Valor	Múltiple original		Múltiple acero negro		Múltiple Inoxidable		Múltiple Aluminizado	
	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
Máximo prueba 1	59.060	124.210	59.806	124.888	61.372	124.345	61.521	126.515
Máximo prueba 2	60.179	126.379	60.104	123.803	62.938	125.294	65.697	127.057
Máximo prueba 3	60.776	126.108	60.328	125.023	61.074	125.701	63.982	128.549
Valor mínimo	59.060	124.210	59.806	123.803	61.074	124.345	61.521	126.515
Mediana	60.179	126.108	60.104	124.888	61.372	125.294	63.982	127.057
Valor máximo	60.776	126.379	60.328	125.023	62.938	125.701	65.697	128.549
Desviación estándar	0.87	1.18	0.26	0.67	1.00	0.70	2.10	1.05
Rango	1.72	2.17	0.52	1.22	1.86	1.36	4.18	2.03
Promedio	60.0	125.6	60.1	124.6	61.8	125.1	63.7	127.4

Nota: Valores máximos a 5800 rpm para potencia y 3500 rpm para torque

Para el análisis se trabajó con los valores máximos promedio de potencia y torque de cada prueba. En la figura 54 se muestra el valor de elevación de potencia al usar los múltiples con diferentes materiales, respecto al original.

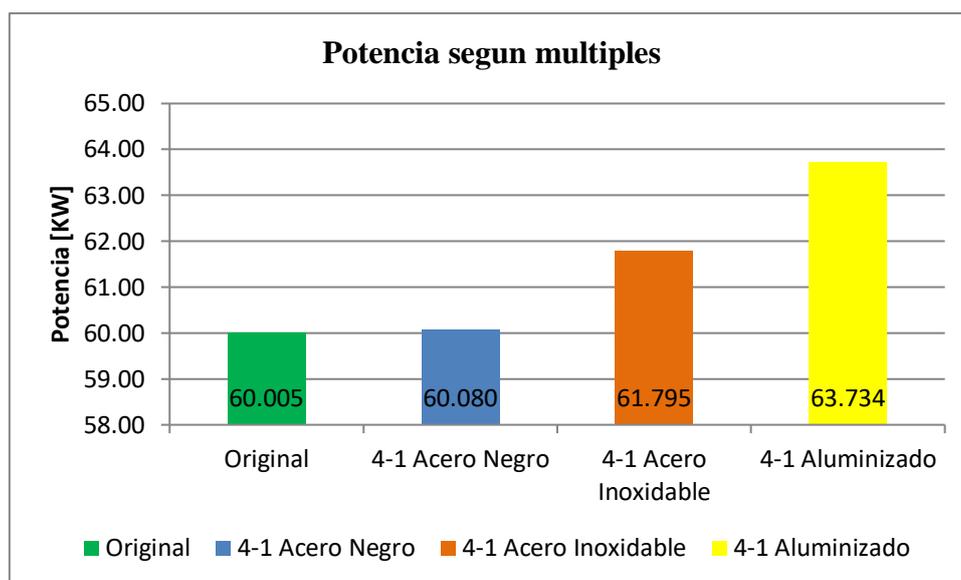


Figura 54. Comparación de potencia máxima

El porcentaje de incremento de potencia con los múltiplos 4-1 en relación al original, se ve reflejado en la figura 55.

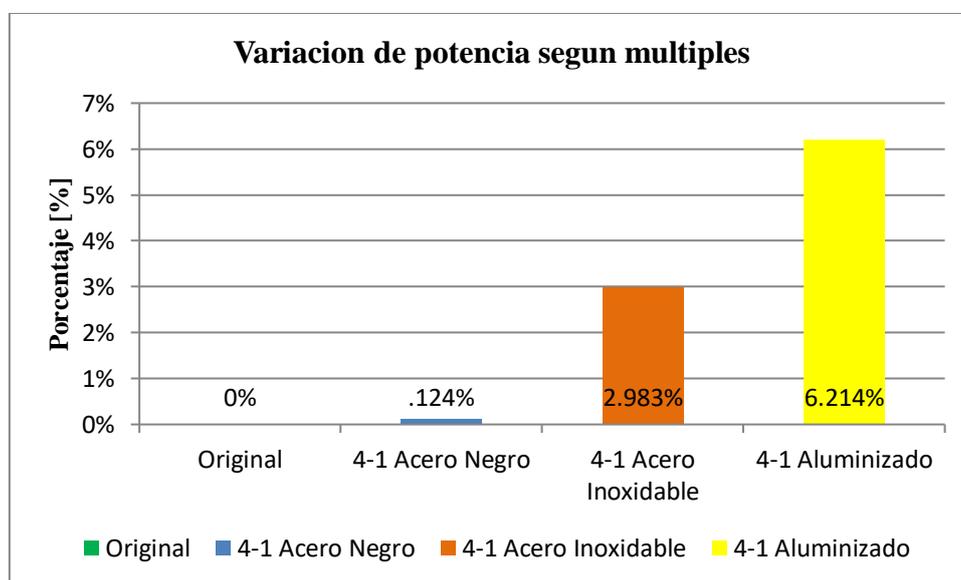


Figura 55. Porcentaje de variación de potencia

Se establece que existe un aumento de potencia de 0.1 % al usar el múltiple en acero negro, 3% al usar el múltiple en acero inoxidable y 6.2 % con el múltiple de aluminizado, respecto al colector original del Renault Duster, estos resultados se los puede justificar ya que los

autores Rodríguez y Nogueira (2011) dicen que la potencia de un motor aumenta ya que aumenta el torque o la velocidad angular de cigüeñal, en nuestra investigación se tiene un aumento del torque con el material aluminizado lo que ratifica el aumento de la potencia con este material.

La variación de torque según el múltiple de escape usado se presenta en la figura 56.

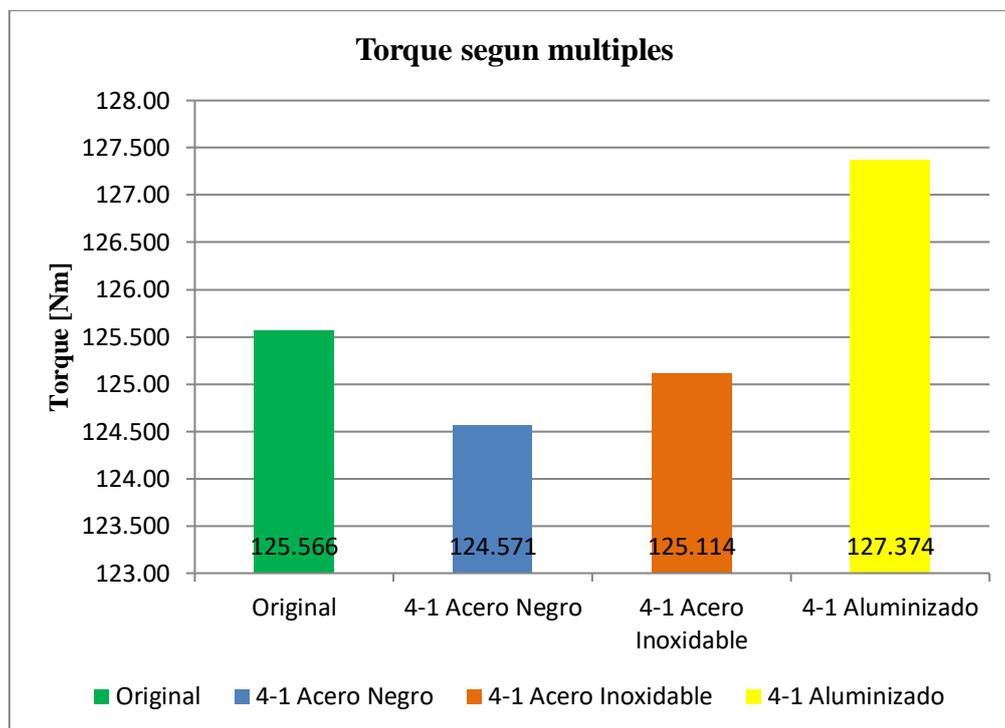


Figura 56. Comparación de torque máximo.

El porcentaje de incremento de torque al usar la configuración 4-1, en relación al múltiple original se indica en la figura 57.

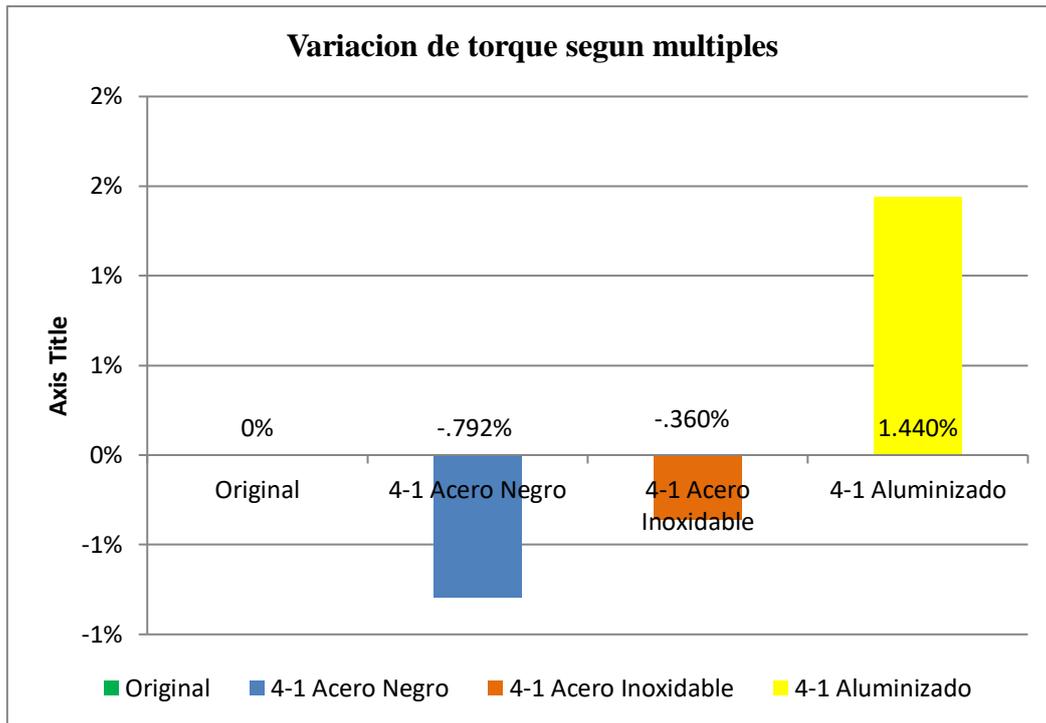


Figura 57. Porcentaje de variación de torque

Conforme a las mediciones existe un incremento en el torque al utilizar la configuración 4-1 de -0.8 % para el material de acero negro, -0.4 % para el múltiple de acero inoxidable y 1.4 % para el de aluminizado. De igual forma el proceso de construcción influye fuertemente en los resultados ya que Rodríguez y Nogueira (2011) nos indican que el torque de un motor aumenta ya que al mejorar el diseño del múltiple se mejora el rendimiento indicado, mecánico y volumétrico del motor, esto se puede justificar ya que al reducir la contrapresión en el múltiple aumenta el rendimiento del motor.

### **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 en material acero negro, acero inoxidable y aluminizado.

### Múltiple original.

En la figura 58 se observa las curvas de potencia obtenidas del proceso de simulación unidimensional y del ensayo experimental.

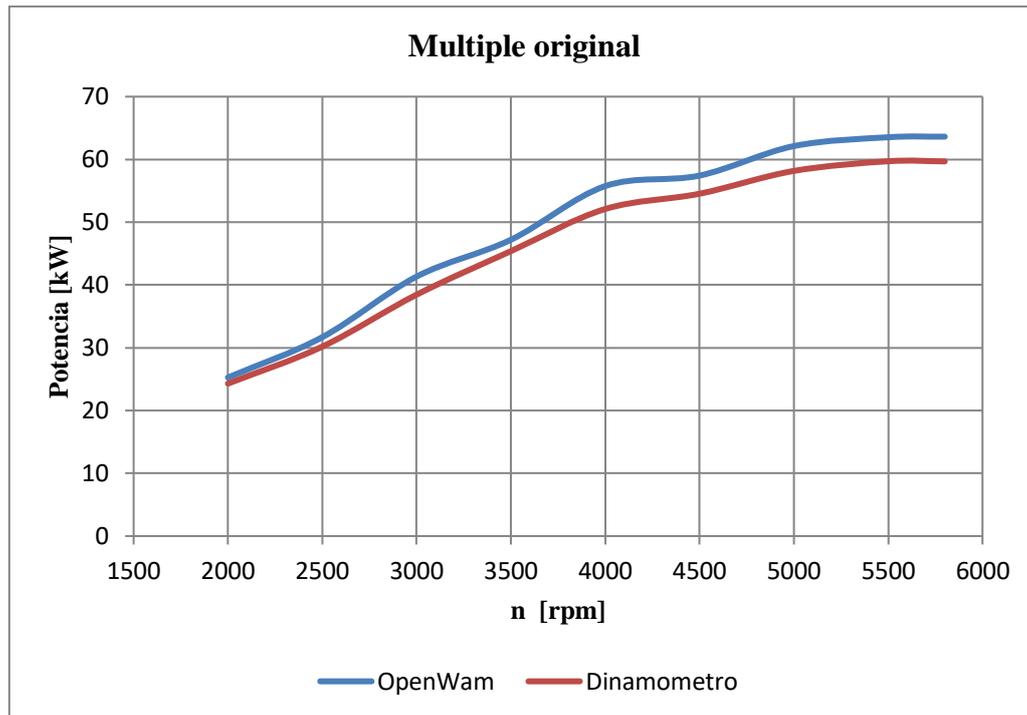


Figura 58. Comparación de curvas de potencia del múltiple original

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 24), en la cual se analiza la variación entre el proceso computacional respecto al experimental.

Tabla 24.

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>
2000	24.285	25.257	4
2500	30.176	31.685	5
3000	38.454	41.338	7.5
3500	45.389	47.205	4
4000	52.100	55.747	7
4500	54.536	57.427	5.3
5000	58.166	62.121	6.8
5500	59.707	63.528	6.4
5800	59.682	63.621	6.6
		Valor mínimo	4
		Mediana	6.4
		Valor máximo	7.5
		Desviación estándar	1.3
		Rango	3.5
		Promedio	5.8

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 59.

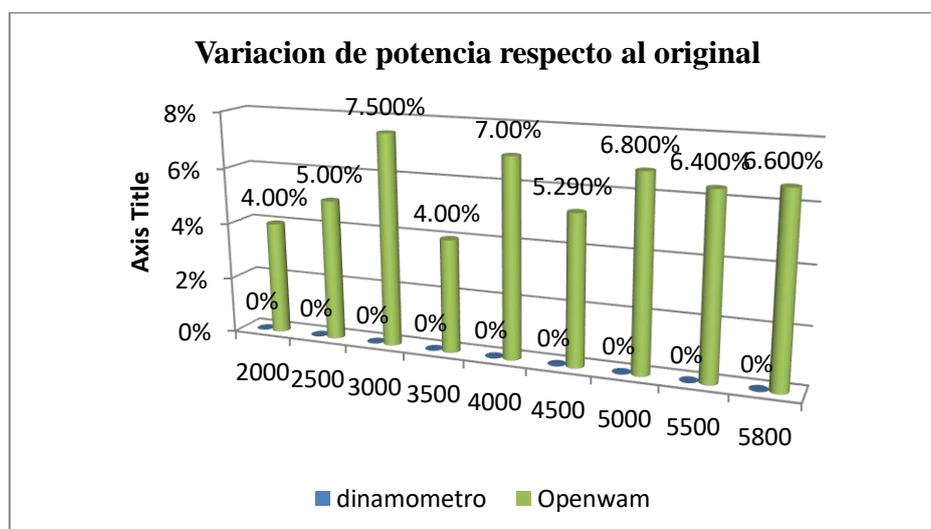


Figura 59. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple original

Se establece un error promedio de 5.8 % en los resultados de la simulación con respecto a los datos reales obtenidos de las pruebas en dinamómetro. Sin embargo, la diferencia es del 6.6 % en la zona de interés, es decir, donde la potencia es máxima (sobre las 5750 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 dinamométricas, para el múltiple 4-1 construido en diferentes materiales, como se muestra en la figura 60.

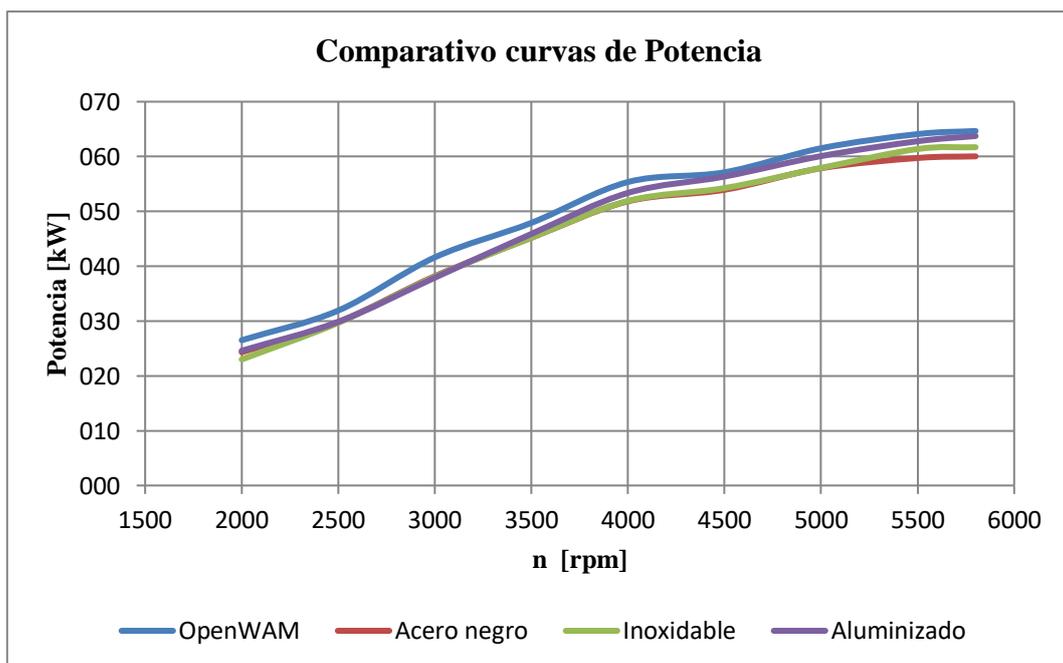


Figura 60. Comparación de curvas de potencia del múltiple 4-1

En la tabla 25 se presenta un cuadro estadístico para analizar la variación de resultados de la simulación 1D respecto al ensayo experimental con los múltiple 4-1 de construcción en acero negro, inoxidable y aluminizado. Los porcentajes de variación indican de acuerdo a la diferencia entre la simulación y cada tipo de construcción.

Tabla 25.

Diferencia de resultados potencia entre simulación y pruebas dinámicas para múltiple 4-1.

<b>n</b>	<b>Dinamómetro: Acero negro</b>	<b>Dinamómetro: Inoxidable</b>	<b>Dinamómetro: Aluminizado</b>	<b>1D OpenWAM</b>	<b>Variación 1D-Acero negro</b>	<b>Variación 1D- inoxidable</b>	<b>Variación 1D- aluminizado</b>
<b>[rpm]</b>	<b>[kW]</b>	<b>[kW]</b>	<b>[kW]</b>	<b>[kW]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>
2000	24.31	22.99	24.58	26.50	9	15	8
2500	29.83	29.68	29.85	31.92	7	8	7
3000	38.18	38.08	37.91	41.62	9	9	10
3500	45.19	45.19	45.89	47.90	6	6	4
4000	51.83	51.90	53.37	55.35	7	7	4
4500	53.94	54.24	56.35	57.12	6	5	1
5000	57.87	57.92	60.08	61.51	6	6	2
5500	59.73	61.37	62.79	64.09	7	4	2
5800	60.03	61.70	63.73	64.65	8	5	1
				Valor mínimo	6	4	1
				Mediana	7	6	4
				Valor máximo	9	15	10
				Desviación estándar	1.2	3.3	3.1
				Rango	3	11	8
				Promedio	7	7	4

En la figura 61 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 dinámicas con el múltiple 4-1 fabricado según los dos métodos.

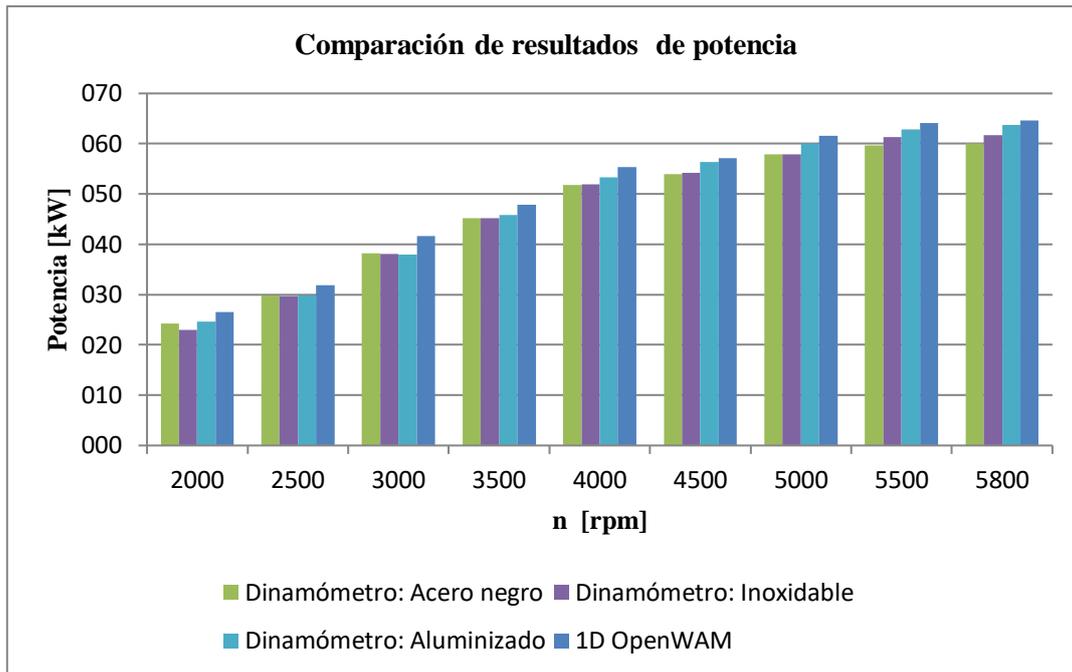


Figura 61. Comparación de resultados de potencia para múltiple 4-1

Los porcentajes de variación de potencia de la simulación 1D respecto a los resultados experimentales con los múltiple 4-1 en diferentes materiales se muestran en la figura 62 de color amarillo, mientras que, en azul consta la variación de la simulación en relación al tipo B.

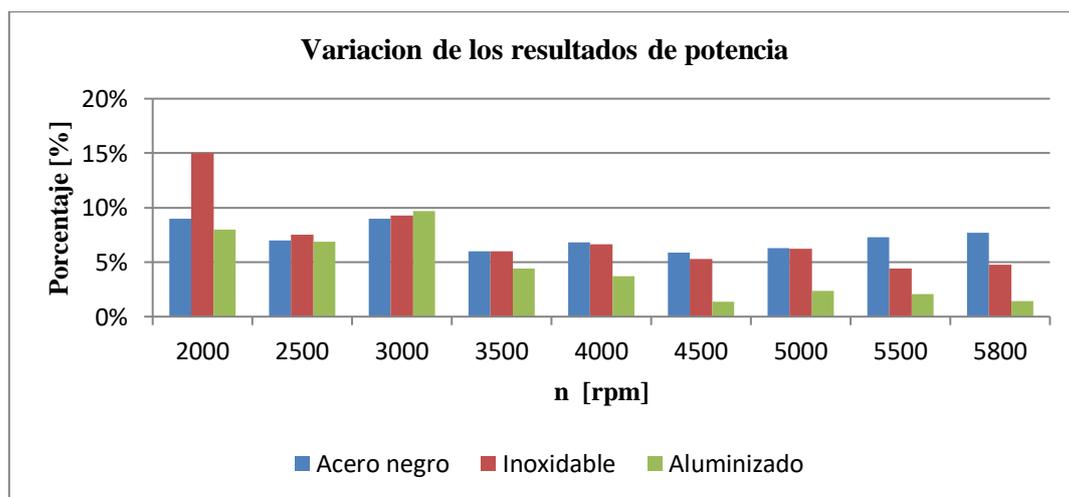


Figura 62. Porcentajes de variación de resultados de potencia para múltiple 4-1

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 acero inoxidable, 5% en el caso de acero inoxidable y solo el 1 % para el aluminizado.

Todos los resultados comparados se pueden ratifica en la investigación de Ayala (2015), donde a pesar de tener diferencias en los valores de las simulaciones y las pruebas dinamométricas, estas diferencias se dan ya que en las simulaciones no se consideran las perdidas mecánicas pero las siluetas de las curvas de torque y potencia tanto del múltiple original como el del múltiple fabricado tienen un alto grado de semejanza, y mas aun con el múltiple de aluminizado.

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 comparativamente cortos.

## **Conclusiones**

Se diseñó el múltiple de escape para el motor K4M del vehículo Renault Duster 1.6 mediante un proceso de simulación computacional 1D/3D, el cual fue validado con los ensayos experimentales en un banco de pruebas dinamométricas del Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV), el cual 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 en diferentes longitudes, se seleccionó el diseño 4-1, con tubos de 1 ½” de diámetro y 420 mm de longitud, puesto que es la dimensión en la cual no se tiene que realizar modificaciones en el sistema de escape de gases

Los valores de torque y potencia obtenidos de la simulación con OpenWAM para el múltiple original tienen una diferencia promedio de 6.6 % 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.

El modelado 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. Pero una desventaja del modelado 1D, es la de proporcionar al programa datos experimentales de la geometría y funcionamiento específicos de cada del motor analizado, para poder obtener los resultados acertados.

El mejor múltiple de escape de configuración 4-1 es el que se fabricó en material aluminizado el cual incremento la potencia máxima respecto al sistema original en 6.4 %. De igual manera este múltiple presenta un incremento de torque de 1.4 % en relación al original. El aporte más significativo al desempeño del motor lo hace en altas revoluciones, esto es, sobre las 5 750 rpm, que es lo mismo que recomienda el fabricante.

El método empleado para evaluar el rendimiento del motor, variando el material del múltiple de escape mediante la simulación 1D, y analizando el flujo según el material del múltiple con la simulación 3D, permitió obtener mayor potencia y torque en el motor K4M del vehículo Renault Duster 1.6. La validez de este método se fundamenta en la proximidad de la silueta de las curvas características del motor y la mínima diferencia de valores, respecto a los datos experimentales obtenidos de las pruebas dinamométricas basadas en la norma INEN 960.

## **Recomendaciones**

Se recomienda el empleo de las simulaciones unidimensionales mediante el *software* OpenWAM, para el diseño de múltiples de escape configuración 4-1 en vehículos equipados con motores de encendido provocado de cuatro tiempos y cuatro cilindros, en donde se debe conocer las especificaciones técnicas del motor dados por el fabricante, para adquirir resultados reales y curvas características de torque y potencia conformes al funcionamiento del motor analizado.

Se recomienda el uso de la software de simulacion computacional unidimensional y tridimensional en estado estático para el diseño de múltiples de escape para rangos de altas revoluciones según las recomendaciones del fabricante, ya que permite obtener una buena aproximación de resultados con un bajo costo computacional.

Se recomienda que en el proceso de fabricación se utilice geometrías de construcción sencilla, que pueda llevarse a cabo con los materiales y herramientas disponibles en el medio, disminuyendo el número de curvaturas y secciones a fin de ayudar el proceso de unión de juntas de los elementos 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 implementar un banco de pruebas dinamométricas calibrado acorde a la normativa INEN en la Universidad Internacional SEK, que permita el desarrollo continuo de investigaciones en cuanto a rendimiento de motores de combustión interna.

## **Bibliografía**

- Alonso, J. M. (2009). *Técnicas del Automóvil MOTORES*. Madrid: Paraninfo.
- Arroyo Teran, E. (2017). *Optimización del múltiple de escape para un vehículo de competición con motor de combustión*. Obtenido de Universidad Internacional SEK.
- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. (2016). *Anuario 2016*. 74.
- Autodesk. (2019). Autodesk CFD. Obtenido de <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>
- Benajes, J., & Navarro, E. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona, España: Reverté.
- Bermudez, V., & Tormos, B. (2011). *Perdidas Mecánicas*. En F. Payri, & J. Desantes, *Motores de combustion interna alternativos* (págs. 152-172). Barcelona: Reverté.
- Cuadrado, I., Agudelo, J., & Sanchez, C. (2008). *Flujo compresible en multiples de motores*. En U. d. Antioquia. Colombia.
- 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).
- El Comercio. (4 de abril de 2011). *Fabricantes de autopartes amplían su negocio*. El Comercio.

- Escudero, S., Gonzáles, J., Rivas, J., & Suárez, A. (2011). Motores. Madrid: MACMILLAN Profesional.
- Eyssautier, M. (2016). METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS APLICADAS. México: trillas.
- Federación Internacional del Automovilismo. (2017). Código Deportivo Internacional. Anexo J . Recuperado el 20 de 06 de 2018, de <http://www.fia.com/regulation/categ>
- Galindo, F., & Hernández, J. (2011). Modelado de motores. En F. Payri, & J. Desantes, Motores de combustión interna alternativos (págs. 746-796). Barcelona: Reverté.
- Galindo, J., Lujan, J., Serrano, J., 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*, 1738-1746. doi:10.1016/j.mcm.2010.11.078
- Goñi, J., & Rojas, M. (2016). MANUAL DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Y TECNOLOGÍA AUTOMOTRIZ. Lima: Fondo.
- González, D. (2015). *Motors térmicos y sus sistemas auxiliares* . Madrid: Paraninfo.
- Grupo Spurrier. (2013). PRO ECUADOR. Obtenido de INSTITUTO DE PROMOCIÓN DE EXXPORTACIONES E INVERSIONES: <http://www.proecuador.gob.ec/wp->

content/uploads/2015/06/Perfiles-de-Inversiones-Promocion-de-Inversiones/Perfiles-de-Inversion/Biocombustibles.pdf

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2003). METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. México: McGraw-Hill.

Latorre, M., & Seco, C. (abril de 2013). UNIVERSIDAD MARCELINO CHAMPAGNAT. Obtenido de <http://www.umch.edu.pe/arch/hnomarino/metodo.pdf>

Masi, M., Toffolo, A., & Antonello, M. (2010). Experimental analysis of a motorbike high speed racing engine. *Applied Energy*(doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.033).

Mohiuddin, A., Rahamn, A., & Dzaidin, M. (2007). Optimal desing of automobile exhaust system using GT-Power. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2(1), 40-47.

OMS. (2016). Organización Mundial de la Salud. Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

Payri, F., & Desantes, J. (2011). Motores de combustion interna alternativos. Barcelona: Reverté.

Payri, F., & Desantes, J. (2011). Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: REVERTÉ.

Peng, D.-X. (2017). Effect of unleaded gasoline blended with biofuels on gasoline injector wear and exhaust emissions. *Industrial Lubrication and Tribology*, 69(2),208-214.

RO-DES. (2016). RO-DES. Obtenido de <https://www.ro-des.com/mecanica/que-son-los-inyectores/>

Rodriguez, P., & Nogueira, J. (2011). Curvas características y aplicaciones. En F. Payri, & J. M. Desantes (Edits.). (Reverté, Ed.) Barcelona, España: Motores de combustión interna alternativos.

Rosas, A., & Barona, G. (2011). Elaboracion de un manual de mantenimiento para el dinamómetro de chasis LPS 3000, instalado en el centro de transferencia tecnológica para la capacitacion e investigacion en control de emisiones vehiculares (CCICEV). Quito, Ecuador.

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2012). Recuperado el 12 de 06 de 2018, de Transformación de la Matriz Productiva: [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). Renovacion de la carga en motores 4T. En F. Payri, & J. Desantes, Motores de combustion interna alternativos (págs. 202-237). Barcelona: Reverté.

Térmicos, C.-M. (2017). OpenWAM. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: [www.cmt.upv.es/OpenWam01.aspx](http://www.cmt.upv.es/OpenWam01.aspx)

Torregrosa, A., & Giménez, B. (2011). Flujo en conductores de admisión y escape. En F. Payri, & J. Desantes, Motores de combustión interna alternativos (págs. 174-200). Barcelona: 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 Renault Duster

	1.6 Expression	1.6 Dynamique	1.6 Privilège	2.0 Privilège	2.0 Privilège 4x4
Arquitectura	Carrocería autoportante, monovolumen, 5 pasajeros, 5 puertas.				
Suspensión Delantera	Tipo Mc Pherson, con triángulo inferior y efecto antipercusión, amortiguadores hidráulicos telescópicos, con resortes helicoidales y barra antirollido.				
Suspensión Trasera	Eje flexible semi-independiente, resortes helicoidales de flexibilidad variable, amortiguadores telescópicos hidráulicos y barra antirollido.				Independiente tipo Mc Pherson con Multilink, amortiguadores hidráulicos telescópicos y barra estabilizadora.
Motor	1.6 L 16 v		2.0 L 16 v		
Torque máximo	14.8 mkgf @ 3750 rpm		19.2 mkgf @ 3750 rpm		
Cilindrada	1599 cm <sup>3</sup>		1998 cm <sup>3</sup>		
Tracción	Delantera				Delantera (modo 4x2) 4x4
Diámetro x carrera	79.5 mm X 80.5 mm		82.7 mm X 93 mm		
Tanque de combustible	50 L		50 L		
Velocidad máxima	163 km/h		176 km/h	178 km/h	
Coefficiente aerodinámico	0.402		0.402		
Potencia máxima	110 cv @ 5750 rpm		143 cv @ 5750 rpm		
Volumen del baúl	475 L		400 L		
Neumáticos	215/65 R16				
Combustible	Nafta				
Frenos	Doble circuito en "X", accionamiento hidráulico, discos ventilados delanteros y tambores traseros.				
Dirección	Asistida hidráulica				
Caja	Mecánica 5 velocidades		Mecánica 6 velocidades		Mecánica 6 velocidades
Peso en orden de marcha	1221-1242		1275-1280		1355-1360
Carga útil	500 kg		500 kg		

## Dimensiones



### DIMENSIONES

A	Distancia entre ejes	2673 mm	K	Despeje	210 mm
B	Largo	4315 mm	R1	Ángulo de ataque	30°
G	Ancho	1822 mm	R2	Ángulo de salida	35°
H	Alto	1690 mm			

Activar Window  
Lea Configuración de DC para activar

## Anexo 2. Especificaciones Técnicas Banco de rodillos torque y potencia



**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 genérica, RAL 5010 (bastidor del banco de pruebas, cubiertas)
- Rodillos de carga lacadas, rojo rubí, RAL 3003

#### DATOS TÉCNICOS:

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 3. Pruebas dinamométricas

*Resultados de potencia con el múltiple de escape original*

<b>n [rpm]</b>	<b>P1 [kW]</b>	<b>P2 [kW]</b>	<b>P3 [kW]</b>	<b>Promedio Potencia [kW]</b>
2000	23.788	24.534	24.534	24.285
2100	25.056	25.802	25.876	25.578
2200	26.174	26.920	26.846	26.647
2300	26.995	27.740	27.815	27.517
2400	28.113	29.008	28.934	28.685
2500	29.605	30.500	30.425	30.176
2600	31.320	32.066	32.066	31.817
2700	32.886	33.557	33.482	33.308
2800	34.452	35.123	35.048	34.874
2900	36.242	36.913	36.689	36.614
3000	37.957	38.777	38.628	38.454
3100	39.672	40.567	40.343	40.194
3200	41.014	41.909	41.685	41.536
3300	42.431	43.028	43.028	42.829
3400	43.550	44.295	44.221	44.022
3500	44.817	45.787	45.563	45.389
3600	46.309	47.204	46.980	46.831
3700	47.949	48.620	48.620	48.397
3800	49.441	50.186	50.186	49.938
3900	50.634	51.603	51.529	51.255
4000	51.380	52.498	52.424	52.100
4100	51.827	52.796	53.318	52.647
4200	52.498	53.468	53.244	53.070
4300	52.647	53.691	53.393	53.244
4400	53.020	53.915	53.766	53.567
4500	53.915	54.959	54.735	54.536
4600	54.288	56.078	55.854	55.406
4700	55.034	57.047	56.898	56.326
4800	55.854	57.569	57.644	57.022
4900	56.376	58.091	58.091	57.519
5000	56.898	58.837	58.762	58.166
5100	57.345	59.359	59.210	58.638
5200	57.718	59.881	59.806	59.135
5300	58.016	60.179	59.881	59.359
5400	58.389	60.104	60.030	59.508
5500	58.688	60.030	60.403	59.707
5600	58.986	60.030	60.776	59.930
5700	59.060	59.806	60.776	59.881
5800	58.688	59.732	60.626	59.682
<b>Potencia Máxima</b>	<b>59.060</b>	<b>60.179</b>	<b>60.776</b>	<b>59.930</b>

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

*Resultados de potencia con el múltiple de escape 4-1, material acero negro*

<b>n [rpm]</b>	<b>P1 [kW]</b>	<b>P2 [kW]</b>	<b>P3 [kW]</b>	<b>Promedio Potencia [kW]</b>
2000	24.012	24.459	24.459	24.310
2100	25.280	25.652	25.652	25.528
2200	26.398	26.547	26.696	26.547
2300	27.144	27.368	27.591	27.368
2400	28.188	28.486	28.635	28.436
2500	29.530	29.978	29.978	29.828
2600	31.096	31.544	31.469	31.370
2700	32.737	33.110	33.110	32.985
2800	34.228	34.601	34.526	34.452
2900	35.943	36.465	36.242	36.217
3000	37.808	38.404	38.330	38.180
3100	39.597	40.045	39.970	39.871
3200	41.014	41.462	41.387	41.288
3300	42.207	42.580	42.655	42.481
3400	43.400	43.997	43.922	43.773
3500	44.817	45.339	45.414	45.190
3600	46.309	46.756	46.905	46.657
3700	47.800	48.322	48.322	48.148
3800	49.217	49.739	49.739	49.565
3900	50.559	50.932	51.007	50.833
4000	51.603	51.976	51.902	51.827
4100	52.125	52.573	52.498	52.399
4200	52.498	52.871	52.871	52.747
4300	52.722	53.169	53.244	53.045
4400	52.946	53.468	53.542	53.318
4500	53.840	53.990	53.990	53.940
4600	54.586	55.034	55.183	54.934
4700	55.556	55.928	56.152	55.879
4800	56.227	56.674	56.898	56.600
4900	56.972	57.420	57.420	57.271
5000	57.718	57.942	57.942	57.867
5100	58.315	58.464	58.538	58.439
5200	58.762	59.135	59.210	59.036
5300	59.135	59.433	59.806	59.458
5400	59.359	59.881	59.955	59.732
5500	59.284	59.881	60.030	59.732
5600	59.657	59.881	60.030	59.856
5700	59.657	60.030	60.328	60.005
5800	59.806	60.104	60.179	60.030
<b>Potencia Máxima</b>	<b>59.806</b>	<b>60.104</b>	<b>60.328</b>	<b>60.030</b>

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

*Resultados de potencia con el múltiple de escape 4-1, acero inoxidable*

<b>n [rpm]</b>	<b>P1 [kW]</b>	<b>P2 [kW]</b>	<b>P3 [kW]</b>	<b>Promedio Potencia [kW]</b>
1900	22.595	22.968	23.415	22.993
2000	23.863	24.087	24.534	24.161
2100	24.981	25.354	25.802	25.379
2200	25.876	26.324	26.696	26.299
2300	26.771	27.293	27.666	27.243
2400	27.890	28.412	28.784	28.362
2500	29.232	29.679	30.127	29.679
2600	30.798	31.394	31.693	31.295
2700	32.140	33.035	33.333	32.836
2800	33.632	34.526	34.899	34.352
2900	35.570	36.316	36.689	36.192
3000	37.509	38.106	38.628	38.081
3100	39.224	39.896	40.268	39.796
3200	40.567	41.089	41.611	41.089
3300	41.984	42.506	42.953	42.481
3400	43.251	43.848	44.221	43.773
3500	44.668	45.265	45.638	45.190
3600	46.234	46.607	47.129	46.657
3700	47.949	48.322	48.546	48.272
3800	49.441	49.888	49.963	49.764
3900	50.634	51.156	51.305	51.032
4000	51.305	52.051	52.349	51.902
4100	51.902	52.573	53.095	52.523
4200	52.349	52.871	53.617	52.946
4300	52.647	53.169	53.691	53.169
4400	53.095	53.468	54.064	53.542
4500	53.766	54.288	54.661	54.238
4600	54.661	55.108	55.406	55.058
4700	55.332	56.003	56.301	55.879
4800	55.928	56.898	57.122	56.649
4900	56.450	57.569	57.942	57.320
5000	57.047	58.091	58.613	57.917
5100	57.569	58.613	59.284	58.489
5200	58.389	59.210	60.030	59.210
5300	59.210	60.179	60.850	60.080
5400	60.179	61.372	61.074	60.875
5500	60.850	62.342	60.925	61.372
5600	61.074	62.640	60.626	61.447
5700	61.298	62.938	60.776	61.670
5800	61.372	62.938	60.776	61.695
<b>Potencia Máxima</b>	<b>61.372</b>	<b>62.938</b>	<b>61.074</b>	<b>61.695</b>

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

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

<b>n [rpm]</b>	<b>P1 [kW]</b>	<b>P2 [kW]</b>	<b>P3 [kW]</b>	<b>Promedio Potencia [kW]</b>
2000	24.459	24.310	24.981	24.584
2100	25.802	25.503	26.249	25.851
2200	27.144	26.771	27.591	27.169
2300	27.964	27.815	28.486	28.088
2400	28.635	28.561	29.306	28.834
2500	29.679	29.605	30.276	29.853
2600	31.096	31.171	31.693	31.320
2700	32.588	32.886	33.333	32.936
2800	34.303	34.601	34.974	34.626
2900	35.943	36.092	36.465	36.167
3000	37.584	37.957	38.180	37.907
3100	39.448	39.821	40.045	39.771
3200	41.238	41.611	42.058	41.636
3300	42.804	43.102	43.550	43.152
3400	44.221	44.444	44.892	44.519
3500	45.563	45.861	46.234	45.886
3600	46.980	47.129	47.651	47.253
3700	48.620	48.695	49.217	48.844
3800	50.037	50.336	50.858	50.410
3900	51.454	51.902	52.274	51.877
4000	53.020	53.244	53.840	53.368
4100	54.213	54.362	54.884	54.487
4200	54.735	55.332	55.854	55.307
4300	54.959	56.003	56.450	55.804
4400	55.183	56.376	56.674	56.078
4500	55.481	56.525	57.047	56.351
4600	55.779	56.972	57.420	56.724
4700	56.227	57.718	58.166	57.370
4800	57.271	58.538	59.284	58.364
4900	57.942	59.433	60.254	59.210
5000	58.688	60.328	61.223	60.080
5100	59.732	61.298	61.745	60.925
5200	60.254	62.043	62.267	61.521
5300	60.477	62.938	62.342	61.919
5400	60.552	63.609	62.938	62.366
5500	60.701	64.206	63.460	62.789
5600	61.074	64.579	63.833	63.162
5700	61.298	65.250	63.982	63.510
5800	61.521	65.697	63.982	63.734
<b>Potencia Máxima</b>	<b>61.521</b>	<b>65.697</b>	<b>63.982</b>	<b>63.734</b>

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

*Resultados de torque con el múltiple de escape original*

<b>n [rpm]</b>	<b>M1 [N.m]</b>	<b>M2 [N.m]</b>	<b>M3 [N.m]</b>	<b>Promedio Torque [N.m]</b>
2000	113.633	117.158	117.158	115.983
2100	113.904	117.430	117.836	116.390
2200	113.633	116.752	116.480	115.622
2300	112.277	115.124	115.531	114.311
2400	111.870	115.531	115.124	114.175
2500	113.090	116.480	116.209	115.260
2600	114.989	117.836	117.701	116.842
2700	116.480	118.650	118.514	117.882
2800	117.565	119.735	119.599	118.966
2900	119.328	121.633	120.955	120.639
3000	120.820	123.396	122.854	122.356
3100	122.176	124.888	124.345	123.803
3200	122.447	125.023	124.481	123.984
3300	122.718	124.481	124.481	123.893
3400	122.311	124.481	124.210	123.667
3500	122.311	124.888	124.345	123.848
3600	122.989	125.159	124.616	124.255
3700	123.803	125.430	125.430	124.888
3800	124.210	126.108	126.108	125.475
3900	123.938	126.379	126.108	125.475
4000	122.718	125.294	125.294	124.436
4100	120.820	123.125	124.210	122.718
4200	119.328	121.498	121.091	120.639
4300	116.887	119.192	118.514	118.198
4400	114.989	117.158	116.752	116.300
4500	114.311	116.752	116.074	115.712
4600	112.684	116.480	115.938	115.034
4700	111.734	115.938	115.531	114.401
4800	111.056	114.446	114.582	113.362
4900	109.836	113.226	113.226	112.096
5000	108.616	112.412	112.141	111.056
5100	107.395	111.192	110.785	109.791
5200	106.039	109.972	109.836	108.616
5300	104.548	108.480	107.938	106.988
5400	103.192	106.310	106.175	105.226
5500	101.836	104.276	104.819	103.644
5600	100.615	102.378	103.598	102.197
5700	98.988	100.208	101.836	100.344
5800	96.683	97.903	99.802	98.129
<b>Torque Máximo</b>	<b>124.210</b>	<b>126.379</b>	<b>126.108</b>	<b>125.475</b>

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

*Resultados de torque con el múltiple de escape 4-1, material acero negro*

<b>n [rpm]</b>	<b>M1 [N.m]</b>	<b>M2 [N.m]</b>	<b>M3 [N.m]</b>	<b>Promedio Torque [N.m]</b>
2000	116.752	114.718	116.887	116.119
2100	116.616	114.853	116.752	116.074
2200	115.260	114.582	115.938	115.260
2300	113.768	112.819	114.718	113.768
2400	113.497	112.141	113.904	113.181
2500	114.311	112.819	114.446	113.859
2600	115.802	114.175	115.667	115.215
2700	117.158	115.802	117.023	116.661
2800	117.972	116.752	117.701	117.475
2900	120.142	118.243	119.464	119.283
3000	122.311	120.277	122.040	121.543
3100	123.396	121.904	123.125	122.808
3200	123.803	122.447	123.532	123.260
3300	123.260	122.040	123.396	122.899
3400	123.667	122.040	123.396	123.034
3500	123.667	122.311	123.938	123.306
3600	124.074	122.718	124.481	123.758
3700	124.616	123.260	124.616	124.164
3800	124.888	123.667	125.023	124.526
3900	124.752	123.803	124.888	124.481
4000	124.074	123.125	123.803	123.667
4100	122.447	121.498	122.311	122.085
4200	120.142	119.328	120.142	119.870
4300	118.108	117.023	118.243	117.791
4400	116.074	114.853	116.209	115.712
4500	114.718	114.311	114.582	114.537
4600	114.311	113.362	114.582	114.085
4700	113.633	112.819	114.175	113.542
4800	112.684	111.870	113.226	112.593
4900	111.870	111.056	111.870	111.599
5000	110.650	110.243	110.785	110.559
5100	109.565	109.158	109.700	109.474
5200	108.616	107.938	108.751	108.435
5300	107.124	106.582	107.802	107.169
5400	105.904	104.954	106.039	105.632
5500	103.870	102.920	104.276	103.689
5600	102.107	101.700	102.378	102.062
5700	100.480	99.937	101.022	100.480
5800	98.988	98.446	99.124	98.852
<b>Potencia Máxima</b>	<b>124.888</b>	<b>123.803</b>	<b>125.023</b>	<b>124.526</b>

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

*Resultados de torque con el múltiple de escape 4-1, acero inoxidable*

<b>n [rpm]</b>	<b>M1 [N.m]</b>	<b>M2 [N.m]</b>	<b>M3 [N.m]</b>	<b>Promedio Torque [N.m]</b>
1900	113.497	115.396	117.565	115.486
2000	113.904	115.124	117.023	115.350
2100	113.497	115.260	117.158	115.305
2200	112.412	114.175	116.074	114.220
2300	111.192	113.226	114.718	113.045
2400	110.921	112.955	114.582	112.819
2500	111.734	113.497	115.260	113.497
2600	113.090	115.396	116.345	114.944
2700	113.633	116.887	117.836	116.119
2800	114.718	117.701	119.057	117.158
2900	117.158	119.599	120.820	119.192
3000	119.464	121.362	122.989	121.272
3100	120.820	122.854	124.074	122.582
3200	121.091	122.718	124.210	122.673
3300	121.362	122.854	124.345	122.854
3400	121.633	123.260	124.345	123.080
3500	122.040	123.532	124.481	123.351
3600	122.582	123.667	125.023	123.758
3700	123.803	124.752	125.294	124.616
3800	124.345	125.294	125.701	125.114
3900	123.938	125.159	125.701	124.933
4000	122.447	124.345	125.023	123.938
4100	120.820	122.447	123.667	122.311
4200	119.057	120.277	121.904	120.413
4300	117.023	117.972	119.328	118.108
4400	115.124	115.938	117.430	116.164
4500	114.175	115.124	115.938	115.079
4600	113.497	114.311	115.124	114.311
4700	112.412	113.768	114.446	113.542
4800	111.192	113.226	113.633	112.684
4900	110.107	112.277	112.819	111.734
5000	109.022	111.056	112.006	110.695
5100	107.802	109.836	111.056	109.565
5200	107.260	108.751	110.243	108.751
5300	106.717	108.480	109.565	108.254
5400	106.446	108.480	108.073	107.666
5500	105.632	108.344	105.768	106.582
5600	104.141	106.853	103.463	104.819
5700	102.649	105.497	101.836	103.327
5800	101.022	103.598	100.073	101.564
<b>Torque Máximo</b>	<b>124.345</b>	<b>125.294</b>	<b>125.701</b>	<b>125.114</b>

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

*Resultados de torque con el múltiple de escape 4-1, material aluminizado*

<b>n [rpm]</b>	<b>M1 [N.m]</b>	<b>M2 [N.m]</b>	<b>M3 [N.m]</b>	<b>Promedio Torque [N.m]</b>
2000	116.887	115.938	119.328	117.384
2100	117.430	116.074	119.464	117.656
2200	117.836	116.074	119.735	117.882
2300	116.209	115.396	118.379	116.661
2400	113.904	113.768	116.480	114.718
2500	113.497	113.090	115.531	114.040
2600	114.311	114.446	116.345	115.034
2700	115.260	116.209	117.836	116.435
2800	117.158	117.972	119.192	118.108
2900	118.379	118.786	120.006	119.057
3000	119.735	120.684	121.498	120.639
3100	121.498	122.718	123.260	122.492
3200	122.989	124.074	125.566	124.210
3300	123.803	124.752	126.108	124.888
3400	124.074	124.752	126.108	124.978
3500	124.345	125.159	126.108	125.204
3600	124.752	125.159	126.379	125.430
3700	125.566	125.701	127.057	126.108
3800	125.837	126.515	127.735	126.696
3900	125.972	127.057	128.006	127.012
4000	126.515	127.057	128.549	127.374
4100	126.244	126.650	127.871	126.922
4200	124.481	125.837	127.057	125.792
4300	122.040	124.481	125.430	123.984
4400	119.735	122.311	122.989	121.678
4500	117.836	119.870	120.955	119.554
4600	115.802	118.379	119.192	117.791
4700	114.311	117.294	118.243	116.616
4800	113.904	116.480	117.972	116.119
4900	112.955	115.802	117.430	115.396
5000	112.141	115.260	116.887	114.763
5100	111.870	114.718	115.667	114.085
5200	110.650	113.904	114.446	113.000
5300	109.022	113.362	112.412	111.599
5400	106.988	112.548	111.328	110.288
5500	105.497	111.463	110.107	109.022
5600	104.141	110.378	108.887	107.802
5700	102.649	109.294	107.260	106.401
5800	101.293	108.209	107.260	105.587
<b>Torque Máximo</b>	126.515	127.057	128.549	127.374

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

## Anexo 4. Especificaciones de los materiales de múltiples

### Tubería Aluminizado

#### ALUMINIZADO

Para sistema de escapes de automotores producidos bajo norma ASTM A 500  
(Grado A)

Tubos FUJI de acero con costura por el método ERW

#### 1. DIMENSIONES Y PESO

DIÁMETRO NOMINAL	DIÁMETRO NOMINAL (mm)	ESPESOR NOMINAL (mm)	PESO Kg / m	TUBOS POR ATADO
1 1/4"	31.80	1.50	1.12	61
1 1/2"	38.10	1.50	1.35	61
1 2/3"	42.20	1.50	1.51	37
1 3/4"	44.40	1.50	1.58	37
1 7/8"	48.20	1.50	1.73	37
2"	50.80	1.50	1.82	37
2 1/8"	54.00	1.50	1.98	19
2 3/8"	60.30	1.50	2.18	19
2 1/2"	63.50	1.50	2.29	19
2 7/8"	70.50	1.50	2.55	19



La tubería se produce en longitudes de 6 m. Diferentes medidas, previa consulta de fábrica.

#### 2. MATERIA PRIMA

Normas: ASTM A 463 (01a) DDS T1M - 120

#### 3. PROPIEDADES MECÁNICAS

Resistencia a la tracción: Mínima 28 kg/mm<sup>2</sup>  
 Elongación: Mínima 32%  
 Doblamiento: Rad. mín. de Curvatura= 4  $\mu$  del tubo  
 Temperatura de Trabajo: Máximo 450°

#### 4. TOLERANCIA

Diámetro:  $\pm 0.13$ mm      Longitud:  $\pm 12.7$ mm  
 Espesor: -10.00%      Peso:  $\pm 10\%$

#### 5. RECUBRIMIENTO

Peso del recubrimiento de aluminio = 120 g/m<sup>2</sup>

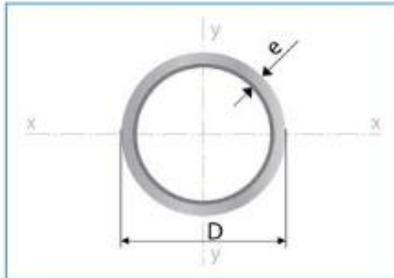
## Tubería acero inoxidable 409

Tubería inoxidable para sistemas de escape de automotores con costura por el método ERW, fabricado con materia prima de norma AISI 409 y bajo norma de producción ASTM 791M.



TUBO DE ACERO INOXIDABLE PARA ESCAPES				
DIÁMETRO (mm)	PULGADAS	ESPESOR (mm)	PESO Kg/m	PESO TUBO 6m
25.40	1"	1.20	0.73	4.39
		1.50	0.90	5.42
31.80	1 1/4"	1.20	0.93	5.55
		1.50	1.15	6.87
38.10	1 1/2"	1.20	1.12	6.69
		1.50	1.38	8.30
		2.00	1.82	10.91
42.20	1 2/3"	1.20	1.24	7.44
		1.50	1.54	9.23
		2.00	2.03	12.15
44.40	1 3/4"	1.20	1.31	7.84
		1.50	1.62	9.73
		2.00	2.14	12.84
48.20	1 7/8"	1.20	1.42	8.53
		1.50	1.76	10.59
		2.00	2.33	13.97
50.80	2"	1.20	1.50	9.00
		1.50	1.86	11.18
		2.00	2.46	14.75
54.00	2 1/8"	1.20	1.60	9.58
		1.50	1.98	11.91
		2.00	2.62	15.72
60.30	2 3/8"	1.20	1.79	10.72
		1.50	2.22	13.33
		2.00	2.94	17.63
63.50	2 1/2"	1.20	1.88	11.30
		1.50	2.34	14.06
		2.00	3.10	18.59
70.50	2 7/8"	1.20	2.10	12.57
		1.50	2.61	15.65
		2.00	3.45	20.71

## Acero negro A500



**Largo Normal:**  
6 metros  
**Recubrimiento:**  
Negro o Galvanizado  
**Norma de Calidad:**  
ASTM A 500 Gr. A, B ó C  
**Norma de Fabricación:**  
NTE INEN 2415  
**Espesores:**  
Desde 1,50 a 6,00 mm  
**Observaciones:**  
Otras dimensiones y largos,  
previa consulta

### Aplicaciones

- Automotriz y de autopartes: carrocería, guardachoques, tubos de escape, remolques y rodados.
- Agroganadera: maquinaria e implementos agrícolas, avícolas y ganaderos.
- Señalización y vialidad: alumbrado, soportes para señalética.
- Aparatos de gimnasia y fitness.
- Construcción: rejas, portones, columnas, andamios.
- Estructuras: portantes, galpones, invernaderos y naves industriales.

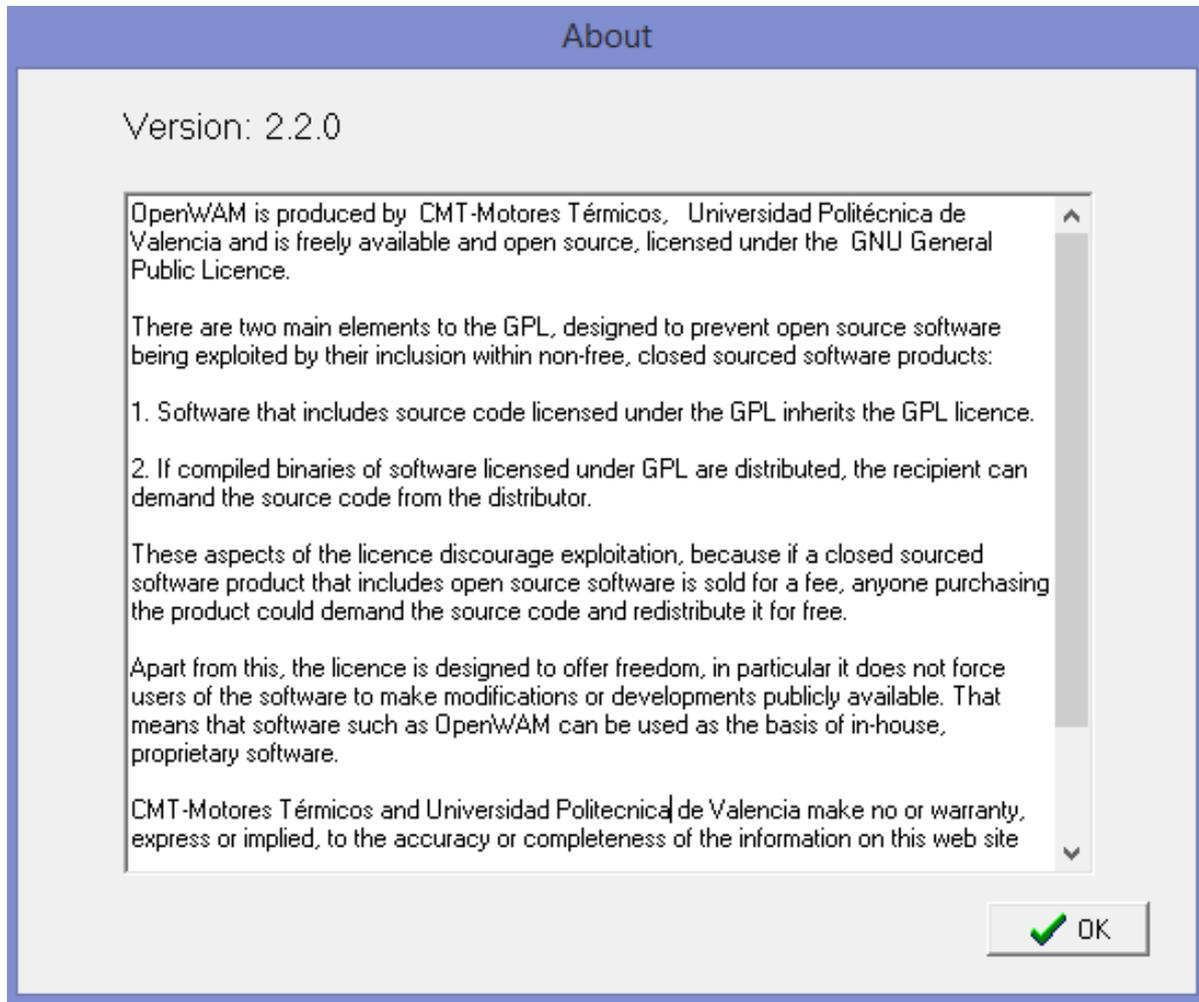
### Beneficios

- Duradero: Al construir con acero, asegura que su producto tenga una vida útil, superior a los materiales de construcción convencionales.
- Económico: Se optimiza el uso del material produciéndose ahorro en obras, por facilidad y rapidez de uso y armado ahorra en tiempo y personal.
- Ecológico: Con el uso de acero, se minimiza la utilización de madera y su desecho, por lo que contribuye al medio ambiente.

Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas			
Diámetro Exterior	Espesor			Flexión			
D	e	A	P	I	W	i	
pulg.	mm	mm	cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
3/4	19,10	1,40	0,78	0,61	0,30	0,32	0,63
		1,50	0,83	0,65	0,32	0,34	0,62
		1,80	0,98	0,77	0,37	0,39	0,61
		2,00	1,07	0,84	0,39	0,41	0,61
7/8	22,20	1,40	0,92	0,72	0,50	0,45	0,74
		1,50	0,98	0,77	0,53	0,47	0,73
		1,80	1,16	0,91	0,61	0,55	0,72
		2,00	1,27	1,00	0,66	0,59	0,72
1	25,40	1,40	1,06	0,83	0,76	0,60	0,85
		1,50	1,13	0,88	0,81	0,64	0,85
		1,80	1,33	1,05	0,93	0,74	0,84
		2,00	1,47	1,15	1,01	0,80	0,83
1 1/4	31,80	1,40	1,33	1,05	1,54	0,97	1,07
		1,50	1,43	1,12	1,63	1,03	1,07
		1,80	1,69	1,33	1,91	1,20	1,06
		2,00	1,87	1,47	2,08	1,31	1,05
1 1/2	38,10	1,40	1,61	1,27	2,72	1,43	1,30
		1,50	1,72	1,35	2,89	1,52	1,30
		1,80	2,05	1,61	3,39	1,78	1,28
		2,00	2,27	1,78	3,71	1,95	1,28
1 3/4	44,50	1,40	1,89	1,49	4,39	1,98	1,52
		1,50	2,02	1,59	4,67	2,10	1,52
		1,80	2,41	1,89	5,49	2,47	1,51
		2,00	2,67	2,09	6,02	2,71	1,50
1 7/8	47,60	1,40	2,03	1,60	5,44	2,28	1,64
		1,50	2,17	1,71	5,79	2,43	1,63
		1,80	2,59	2,03	6,81	2,86	1,62
		2,00	2,87	2,25	7,47	3,14	1,61
2	50,80	1,40	2,17	1,71	6,63	2,61	1,75
		1,50	2,32	1,82	7,06	2,78	1,74
		1,80	2,77	2,18	8,33	3,28	1,73
		2,00	3,07	2,41	9,14	3,60	1,73
2 3/8	60,30	3,00	4,51	3,54	12,92	5,09	1,69
		4,00	5,88	4,62	16,22	6,39	1,66
		1,50	2,77	2,18	12,00	3,98	2,08
		1,80	3,31	2,60	14,18	4,70	2,07
2 1/2	63,50	2,00	3,66	2,88	15,60	5,17	2,06
		3,00	5,40	4,24	22,25	7,38	2,03
		4,00	7,08	5,56	28,21	9,35	2,00
		1,50	2,92	2,29	14,05	4,42	2,19
3	76,20	1,80	3,49	2,74	16,62	5,23	2,18
		2,00	3,86	3,03	18,29	5,76	2,18
		3,00	5,70	4,48	26,15	8,24	2,14
		4,00	7,48	5,87	33,24	10,47	2,11
4	101,60	1,50	3,52	2,76	24,56	6,45	2,64
		1,80	4,21	3,30	29,13	7,85	2,63
		2,00	4,66	3,66	32,11	8,43	2,62
		3,00	6,90	5,42	46,29	12,15	2,59
5	127,00	4,00	9,07	7,12	59,30	15,56	2,56
		5,00	11,18	8,78	71,22	18,69	2,52
		2,00	6,26	4,91	77,63	15,28	3,52
		3,00	9,29	7,29	113,04	22,25	3,49
6	152,40	4,00	12,26	9,63	146,28	28,80	3,45
		5,00	15,17	11,91	177,47	34,93	3,42
		6,00	18,02	14,15	206,68	40,68	3,39
		2,00	7,85	6,17	153,44	24,16	4,42
6 5/8	168,30	3,00	11,69	9,17	224,75	35,39	4,39
		4,00	15,46	12,13	292,61	46,08	4,35
		5,00	19,16	15,04	357,14	56,24	4,32
		6,00	22,81	17,90	418,44	65,90	4,28
6 3/4	184,20	3,00	14,08	11,05	393,01	51,58	5,28
		4,00	18,65	14,64	513,73	67,42	5,25
		5,00	23,15	18,18	629,54	82,62	5,21
		6,00	27,60	21,66	740,57	97,19	5,18
7	203,20	3,00	15,58	12,23	532,28	63,25	5,85
		4,00	20,65	16,21	697,09	82,84	5,81
		5,00	25,65	20,14	855,85	101,70	5,78
		6,00	30,59	24,02	1008,69	119,87	5,74

## Anexo 4. Licencias gratuitas

### Licencia OpenWAM



## Licencia Autodesk CFD

License Manager
✕

---

Licenses currently in use in this application

▼

**Autodesk CFD Ultimate 2019**

Device License : Student Version [Change license type](#)

---

Hardware Details ⓘ	<b>Device name</b> LAPTOP-38HFQ8N8	
License Details ⓘ	<b>Serial number</b> <a href="#">Update</a> 696-96969696	<b>License behavior</b> Extendable
	<b>License models</b> Standard	<b>License expiration date</b> Wednesday, January 12, 2022

Autodesk Plugins, Add-ons and Extensions

>

**Autodesk CFD Ultimate 2019**

Device License : Student Version [Change license type](#)

## Licencia Autodesk Inventor

License Manager
✕

---

Licenses currently in use in this application

▼

**Autodesk Inventor Professional 2019**

Device License : Student Version [Change license type](#)

---

Hardware Details ⓘ	<b>Device name</b> LAPTOP-38HFQ8N8	
License Details ⓘ	<b>Serial number</b> <a href="#">Update</a> 696-96969696	<b>License behavior</b> Extendable
	<b>License models</b> Standard	<b>License expiration date</b> Wednesday, January 12, 2022