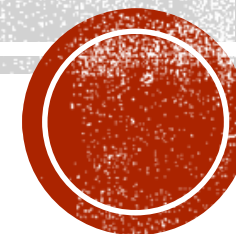


FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA

**MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO
MENCION FABRICACIÓN DE AUTOPARTES DE VEHÍCULOS**

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



Autor: Edwin Salomón Arroyo Terán

Director: Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos Msc.

Co-Director: Ph.D. Edilberto Antonio Llanes Cedeño

INTRODUCCIÓN

- Incrementar potencia en vehículos de competición.
- Influencia de la configuración y dimensiones del múltiple de escape en el rendimiento del MCI.
- Uso de herramientas computacionales 1D/3D para reducir costosos ensayos experimentales.



OBJETIVOS

- Diseñar y construir el múltiple de escape para un vehículo con motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros, mediante la simulación computacional 1D/3D y su validación experimental a través de pruebas dinamométricas.
- Analizar las configuración de múltiple 4-2-1 y 4-1, con sus respectivas dimensiones mediante la herramienta de simulación 1D OpenWAM.
- Diseñar el múltiple de escape en el software NX Siemens y realizar un análisis computacional de fluidos en el paquete CFX de Ansys.
- Fabricar el modelo de colector diseñado bajo dos técnicas de construcción.
- Realizar pruebas dinamométricas con el vehículo, para probar los múltiples de escape construidos.



VEHÍCULO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN

Suzuki Twin Cam 1.3

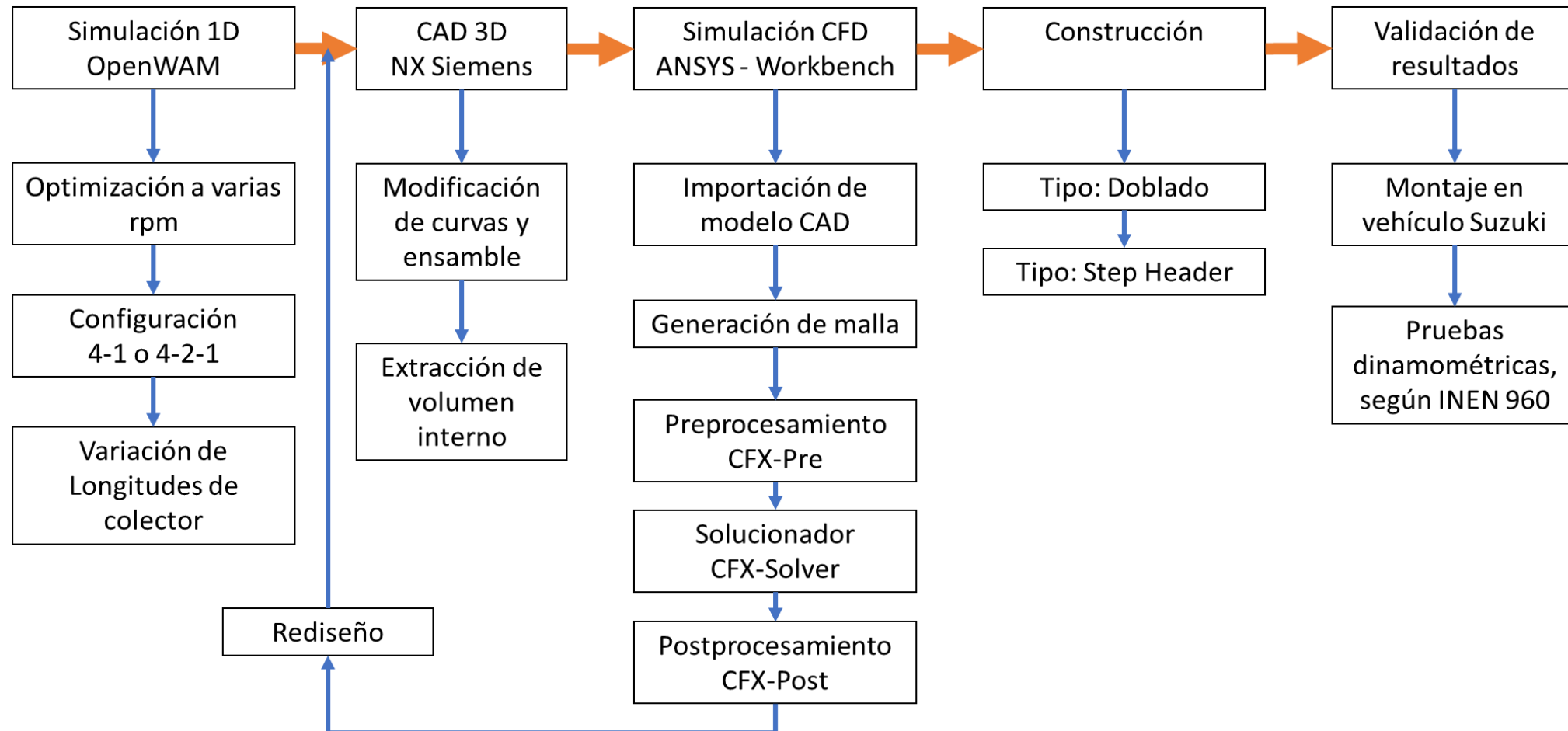


Tabla 1. Especificaciones del motor

Parámetro	Valor
Motor	G13B, DOHC
Cilindrada	1298 cm ³
Diámetro x carrera	74 x 75.5 mm
Relación de compresión	10:1
Orden de encendido	1-3-4-2
Reglaje de encendido - básico APMS	6 ± 1/850 °APMS/rpm
Sistema de combustible	MPF-i
Combustible	Gasolina
Régimen de ralentí	850 ± 50 rpm
Temperatura de trabajo de motor	80°C
Relación Aire-Combustible AFR	14.7:1
Diámetro válvula de admisión	29.1 mm
Apertura válvula de admisión	8° APMS
Cierre válvula de admisión	36° DPMS
Diámetro válvula de escape	24.9 mm
Apertura válvula de escape	42° APMS
Cierre válvula de escape	10° DPMS



MÉTODO



SIMULACIÓN 1D

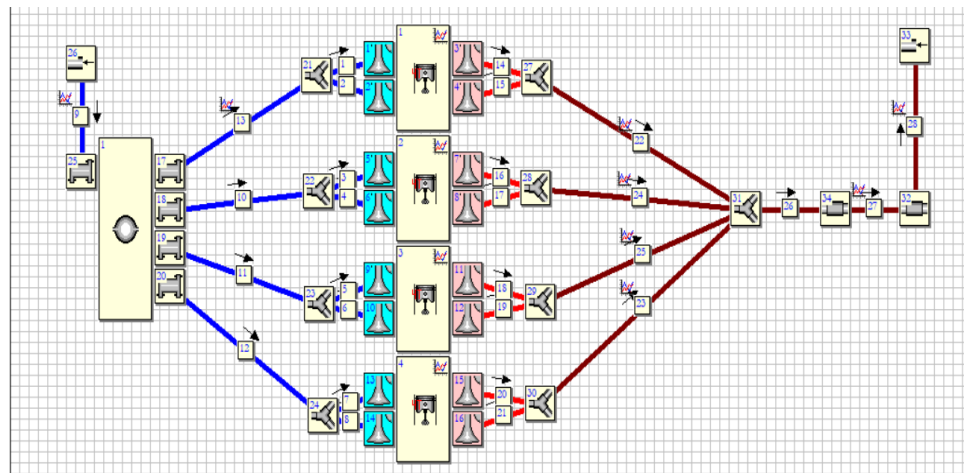
- Software:

-OpenWAM

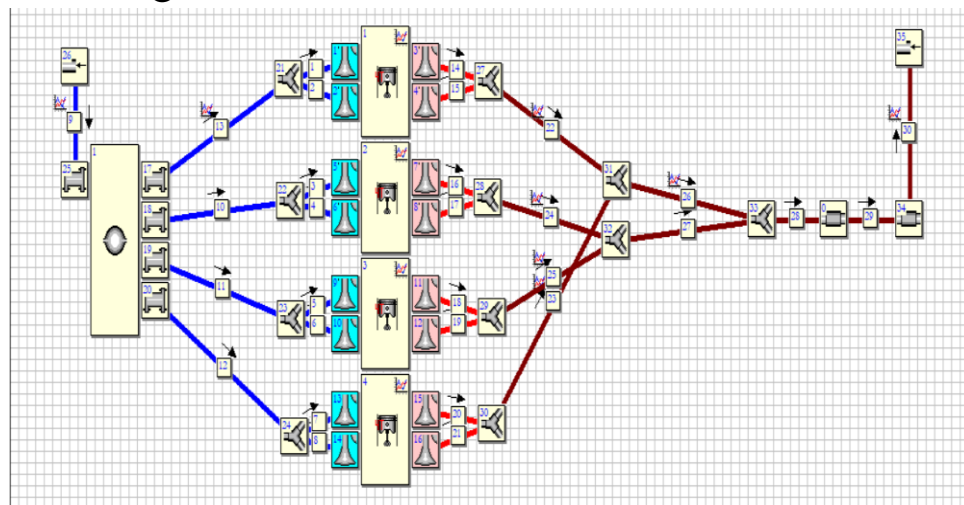


CONFIGURACIÓN Y PARÁMETROS

Configuración 4-1



Configuración 4-2-1



Parámetros de tubería del múltiple de escape

Parámetro	Original		Conf. 4-1	Conf. 4-2-1	
	Primario	Secundario		Primario	Secundario
Diámetro de entrada (mm)	35	31	35	35	41.45
Longitud (mm)	L1: 312	318	500	250	250
	L2: 277		a	a	a
	L3: 244		800	400	400
	L4: 259				
Diámetro de salida (mm)	35	31	35	35	41.45
Método numérico	Lax Wendroff				



SIMULACIÓN 3D

- **Software:**

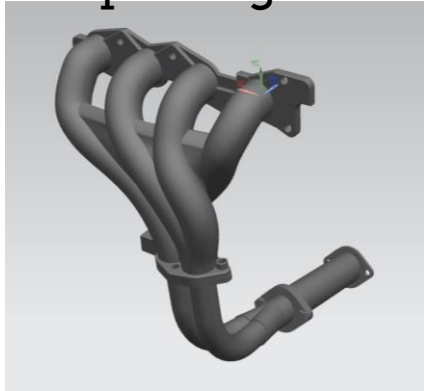
-Modelado: NX Siemens

-CFD: Ansys CFX

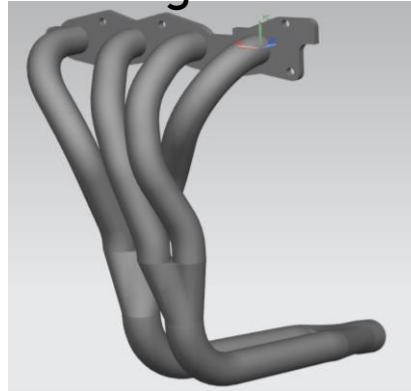


- Modelado 3D

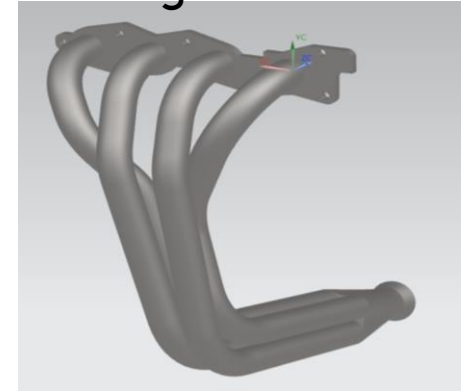
Múltiple original



Configuración 4-2-1

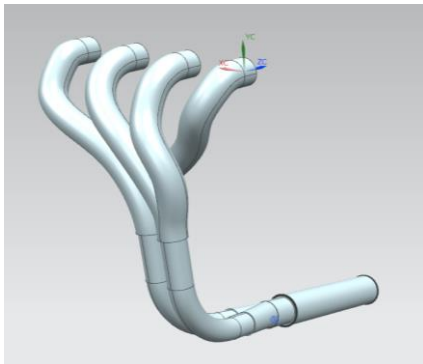


Configuración 4-1

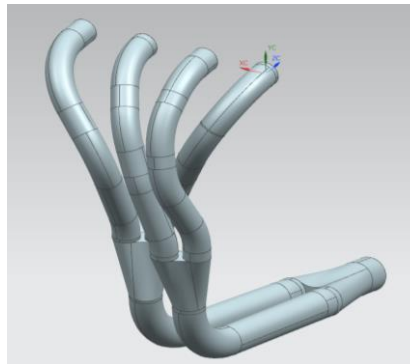


- Extracción de volumen interno

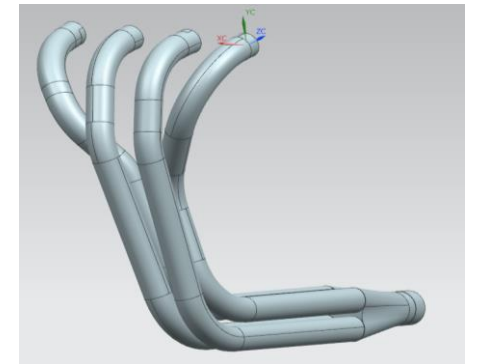
Múltiple original



Configuración 4-2-1



Configuración 4-1



■ Mallado

Elementos: tetraédricos.

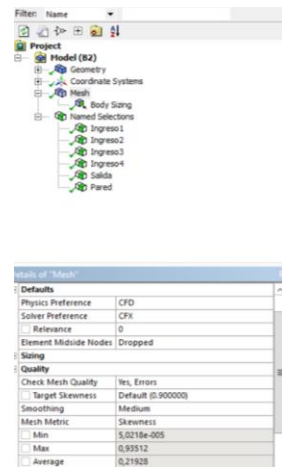
Tamaño: 3 y 5 mm

Calidad de mallado: Factor de Skewness

Rangos de Skewness y calidad de elemento

Skewness	Calidad de mallado
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

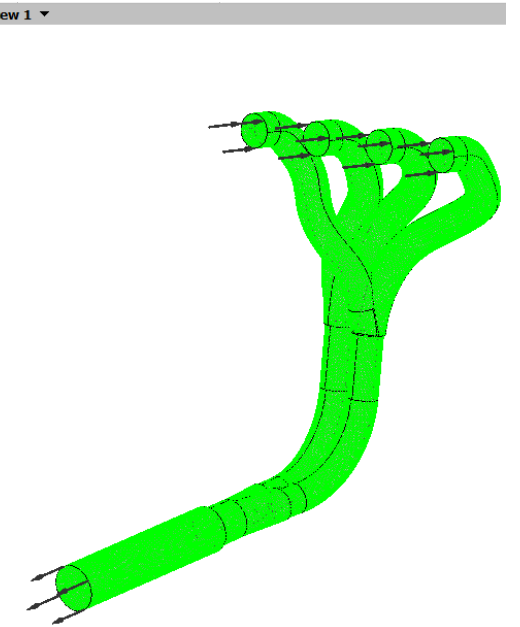
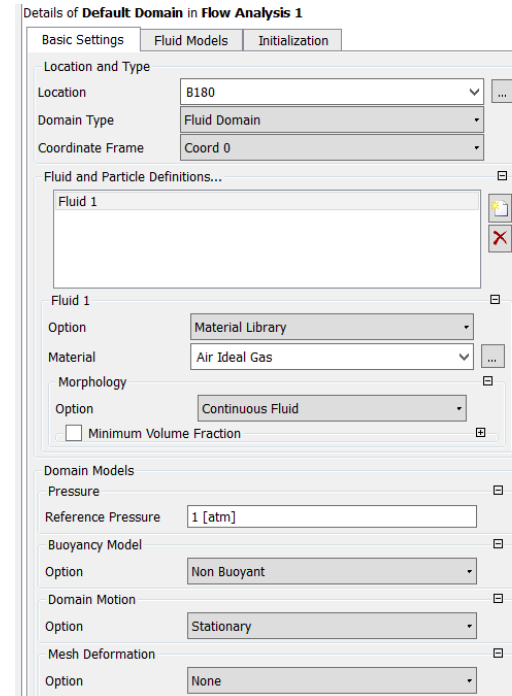


CONFIGURACIÓN CFX-PRE

■ Análisis Estático

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

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



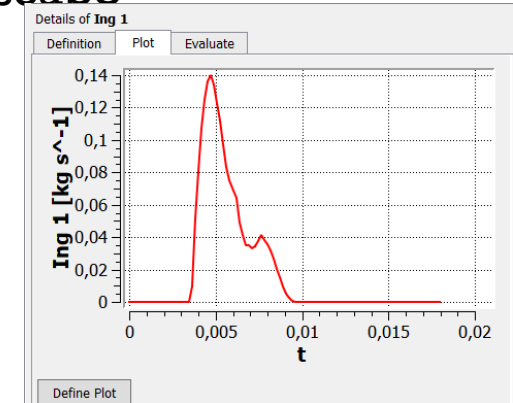
CONFIGURACIÓN CFX-PRE

Condiciones de frontera en el ingreso del múltiple de escape

- **Análisis 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}

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



Function: Ing2

Details of Ing2

Basic Settings

Option: Interpolation (Data Input)

Argument Units: s

Result Units: kg s⁻¹

Interpolation Data

Option: One Dimensional

	Coordinate	Value
1	0	0.13946
2	0.000144	0.14014
3	0.000288	0.13276
4	0.000432	0.12601
5	0.000576	0.11239

Coordinate:

Value:

Add Remove

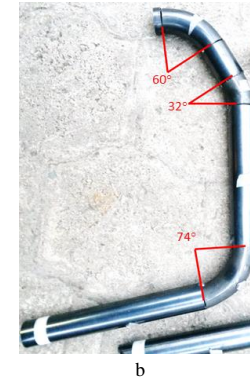
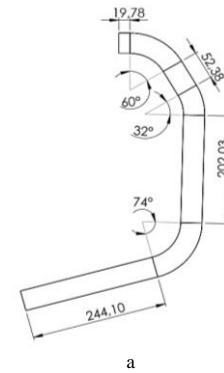
Extend Min

Extend Max



CONSTRUCCIÓN

- Tipo A: Doblado



- Tipo B: Stepheader



PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS

- Dinamómetro MAHA LPS 3000 (CCICEV, Quito, Ecuador)
- Según Norma INEN 960, basada en ISO 1585, ISO 3173
- Factor de corrección según ISO 1585, JIS D 1001, SAE J 1349

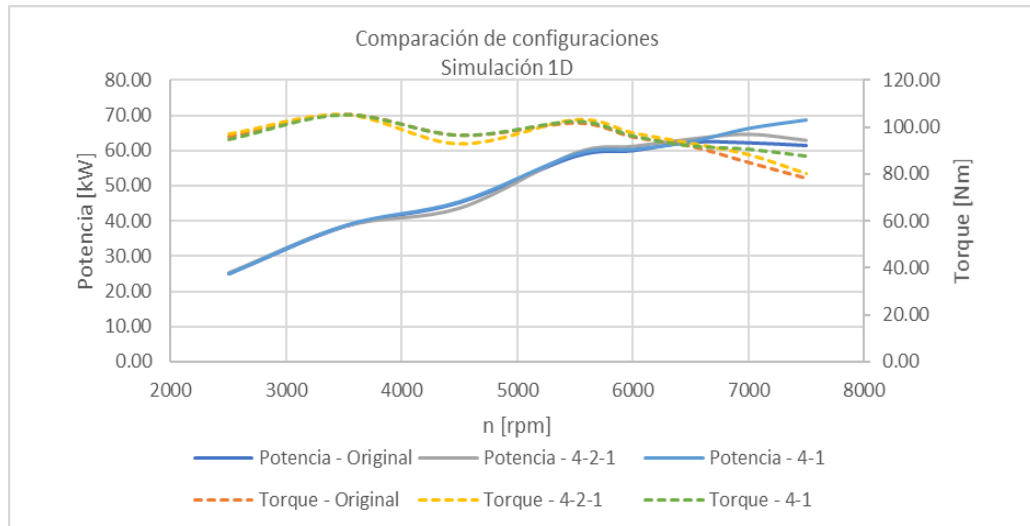
$$\alpha_a = \left(\frac{99}{P_p}\right)^{1.2} * \left(\frac{T_p}{298}\right)^{0.5}$$



RESULTADOS Y ANÁLISIS



SIMULACIÓN 1D



Mejor desempeño:

- Configuración 4-2-1: entre 5 500 a 6 500 rpm.
- Configuración 4-1: en altas revoluciones, sobre las 6 500 rpm.

Incremento de potencia máxima, respecto al múltiple original:

- Configuración 4-2-1: 3.57 %
- Configuración 4-1: 10.1 %

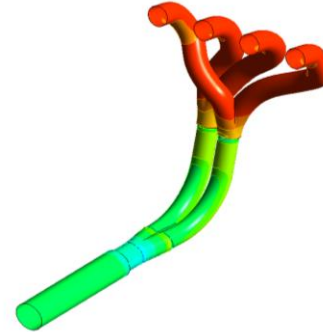
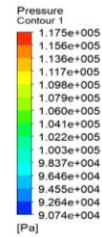
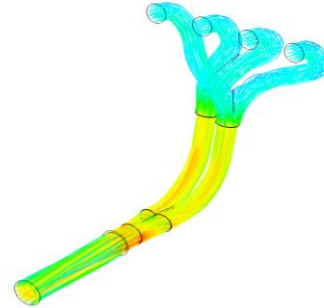
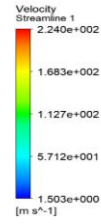
Incremento de torque máximo, respecto al múltiple original:

- Configuración 4-2-1: 0.13 %
- Configuración 4-1: 0.07 %

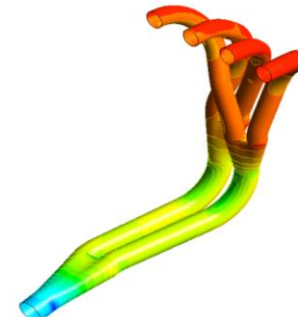
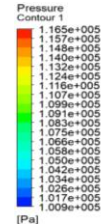
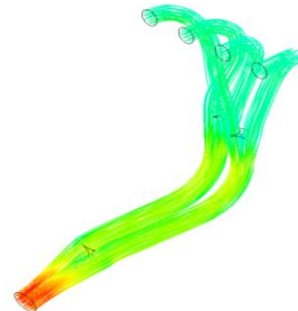
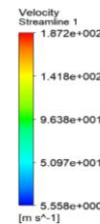


SIMULACIÓN 3D: ANÁLISIS ESTÁTICO

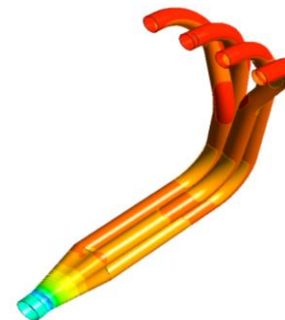
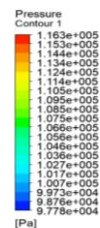
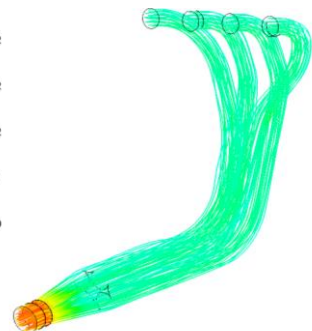
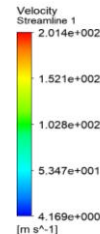
Múltiple original



Diseño 4-2-1



Diseño 4-1



Incremento de Velocidad de entrada, respecto al múltiple original

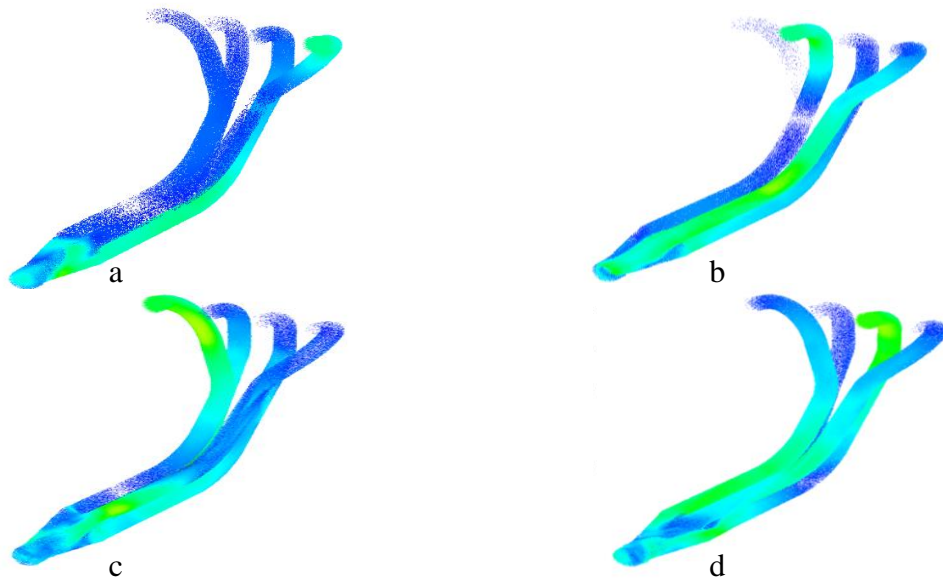
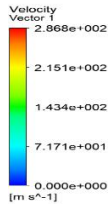
- Configuración 4-2-1: 28,33%
- Configuración 4-1: 32,22%



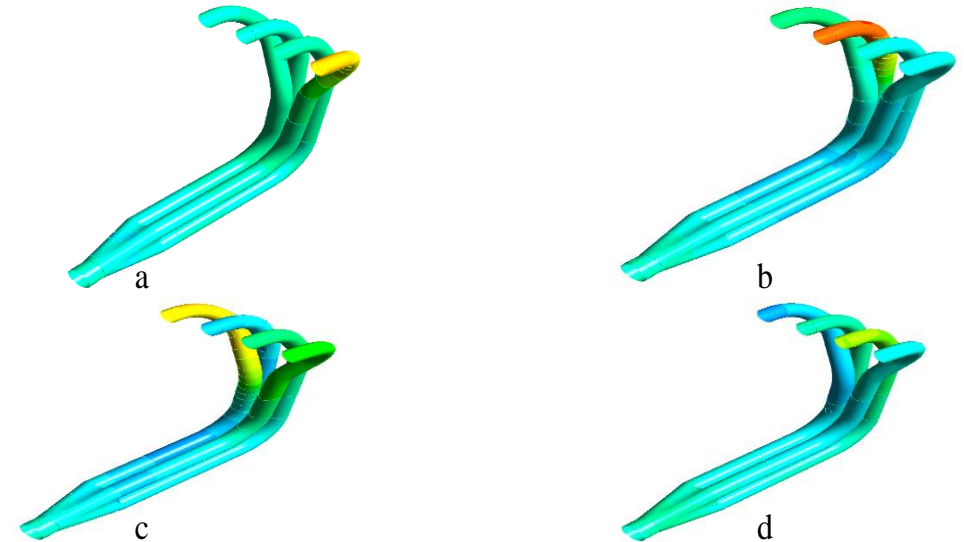
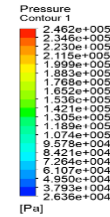
SIMULACIÓN 3D: ANÁLISIS TRANSITORIO

Configuración 4-1

Velocidad



Presión



Incremento de Velocidad en la salida, respecto al múltiple original

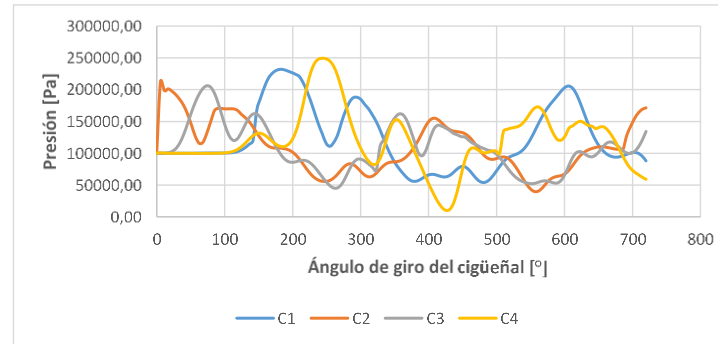
- Configuración 4-2-1: 2 %
- Configuración 4-1: 16 %



SIMULACIÓN 3D: ANÁLISIS TRANSITORIO

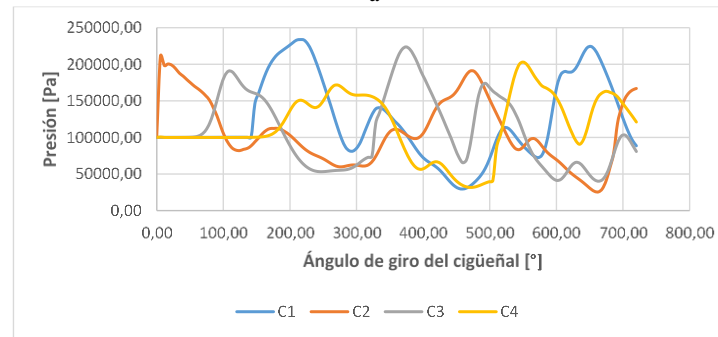
PRESIÓN EN LA ENTRADA DEL MÚLTIPLE

Múltiple original



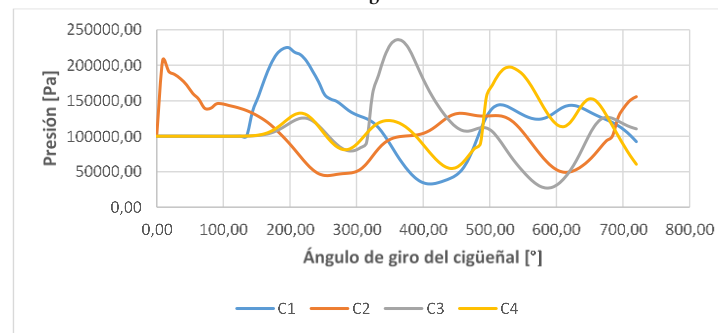
a

Diseño 4-2-1



b

Diseño 4-1

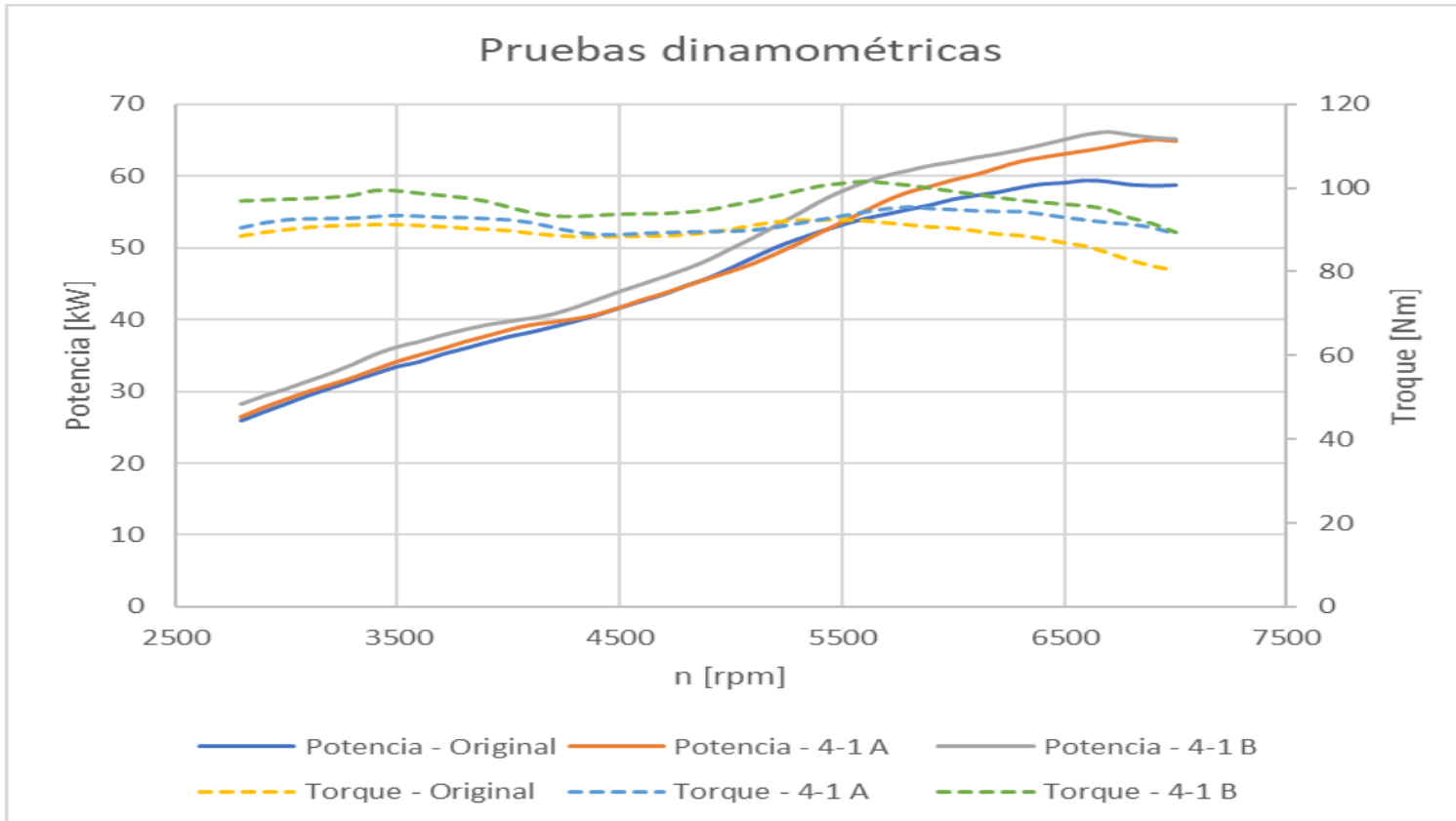


c

Incidencia de un cilindro a otro según el orden de encendido.



PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS



Incremento de potencia máxima respecto al múltiple original

- Configuración 4-1 tipo A: 8,41 %
- Configuración 4-1 tipo B: 10,33 %

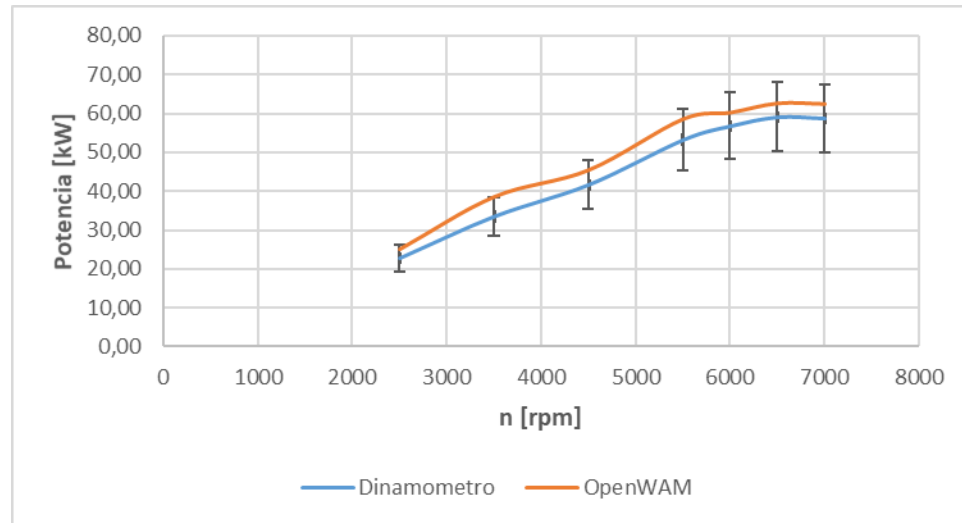
Incremento de torque máximo respecto al múltiple original

- Configuración 4-1 tipo A: 3,26 %
- Configuración 4-1 tipo B: 8,83 %

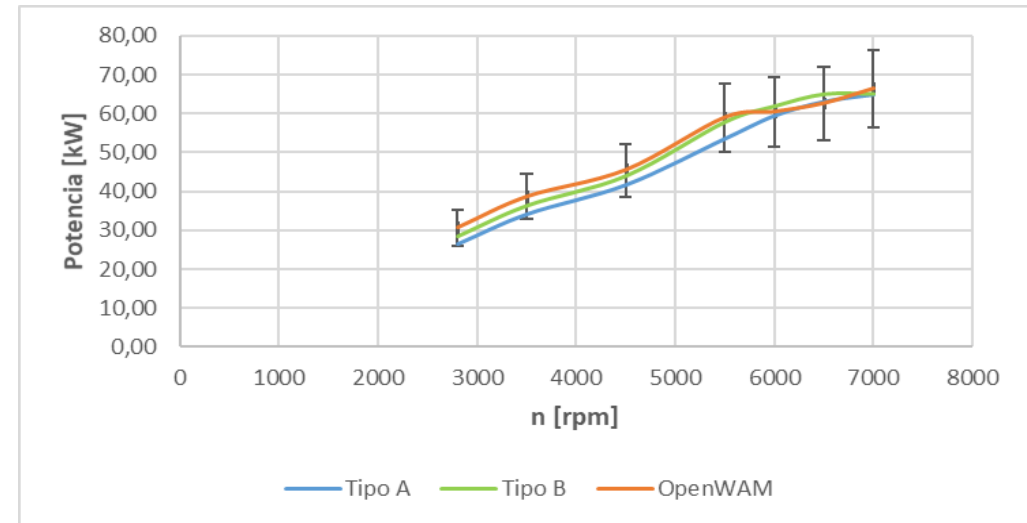


SIMULACIÓN 1D VS PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS

Múltiple original: Error promedio 9 %



Múltiple 4-1: Error promedio
Tipo A: 8 %
Tipo B: 4 %



El análisis del flujo en modelos tridimensionales permitió observar la evolución del fluido en el interior de la tubería, lo cual no es posible con el modelo unidimensional.

En el estudio CFD en estado transitorio se verificó el efecto de los gases combustionados de un cilindro a otro, lo cual es limitado en el caso estacionario. Se encontró que en la configuración 4-2-1 existe mayor influencia entre las presiones generadas en cada colector, por lo que se hace necesario una sintonización de escape adecuada conectando los cilindros desfasados 180° según el orden de encendido.

Incremento en la velocidad de entrada y salida de los gases en los diseños de múltiples analizados.

La configuración 4-2-1 alcanza mejores resultados entre 5500 a 6500 rpm, mientras que la configuración 4-1 tiene mejor respuesta en altas revoluciones, sobre los 6500 rpm.

Existe una influencia importante en el rendimiento del motor según del tipo de construcción del múltiple de escape. El tipo B (stepheader) alcanza mejores resultados.

El múltiple de escape propuesto, de configuración 4-1, incrementa la potencia máxima respecto al sistema original en 8.41 % y 10.33 %, según la construcción tipo A y tipo B, respectivamente; así como también, un aumento de torque de 3.26 % para el tipo A y 8.83 % para el tipo B; el aporte más significativo al desempeño del motor lo hace en altas revoluciones, esto es, sobre las 5 000 rpm.

La metodología empleada mediante la simulación unidimensional, resultó ser una herramienta útil para predecir el rendimiento del motor, con diferencia mínima en los resultados y curvas características, respecto a los datos experimentales obtenidos en un dinamómetro de chasis.

CONCLUSIONES



Utilizar simulaciones 1D con el software OpenWAM, para el diseño de múltiples de escape para vehículos con motor de encendido provocado de cuatro cilindros y cuatro tiempos.

Evaluar la influencia en el desempeño del motor al usar otros materiales durante la construcción del múltiple de escape, como tubos galvanizados o acero inoxidable.

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

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 dinámicas.

Implementar dentro la UISEK un banco de pruebas dinámico calibrado acorde a la normativa INEN.



RECOMENDACIONES