



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

**“Investigación de la eficiencia mecánica al realizar
modificaciones geométricas al colector de escape
en el motor Volkswagen de 1.8 litros”**

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

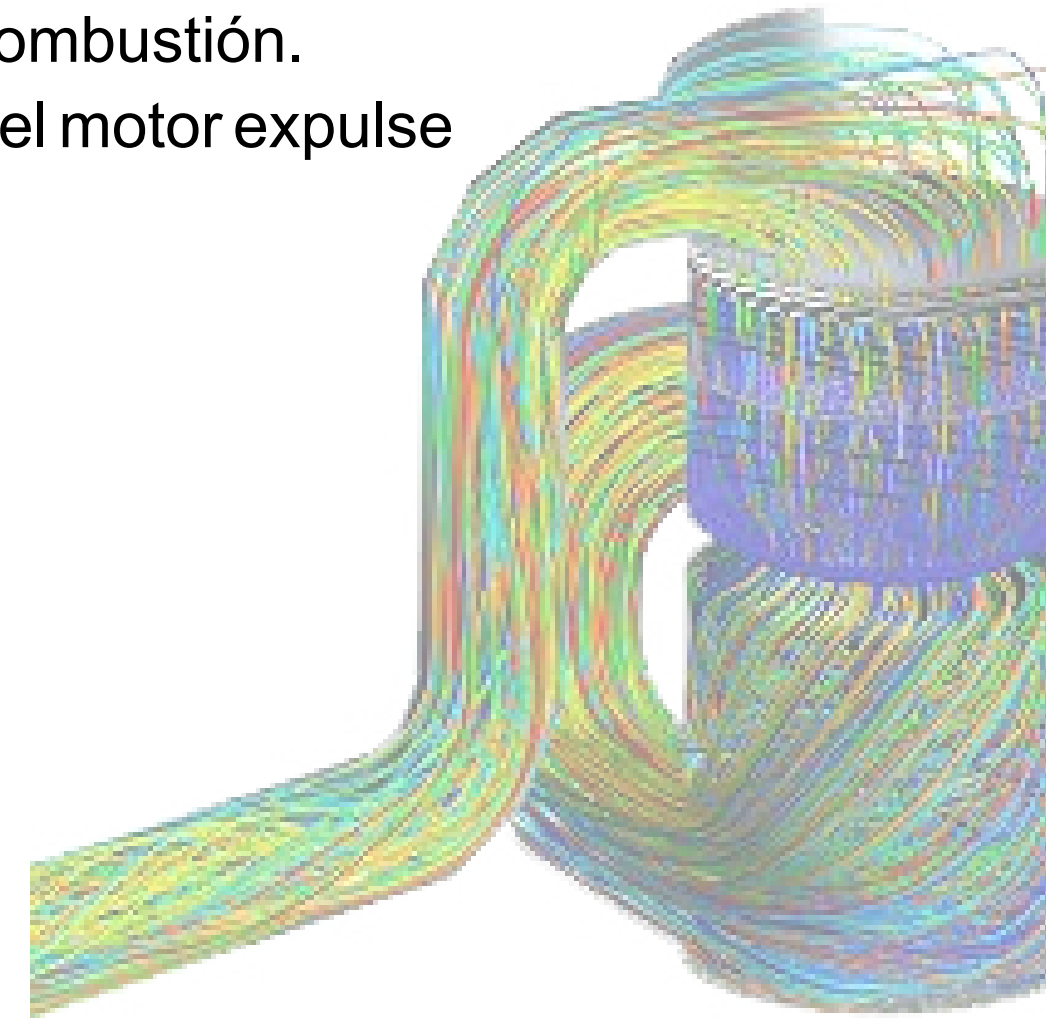
AUTOR: Alex Fernando Checa Altuna
DIRECTOR: Ing. Félix Manjarrés A. M.Sc.

Latacunga-Ecuador
2017



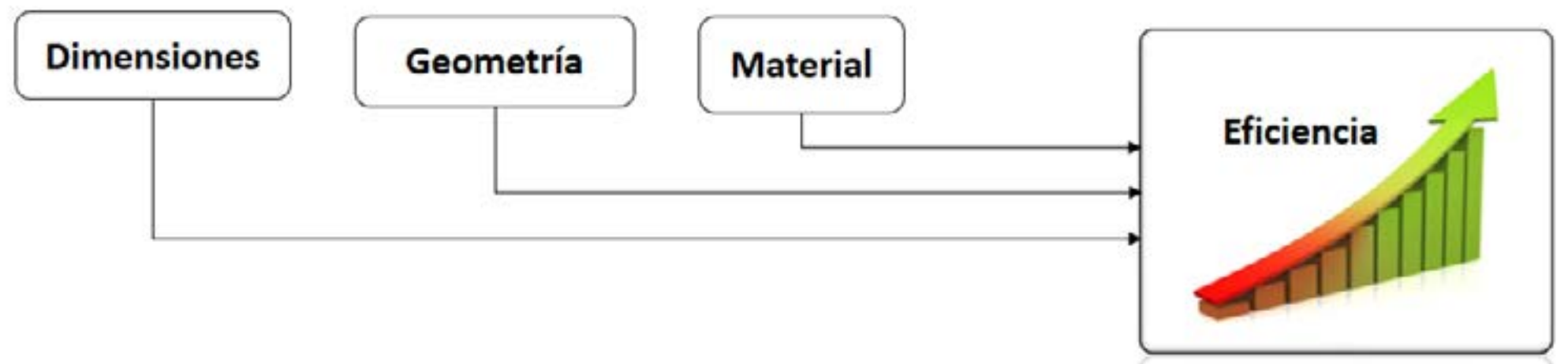
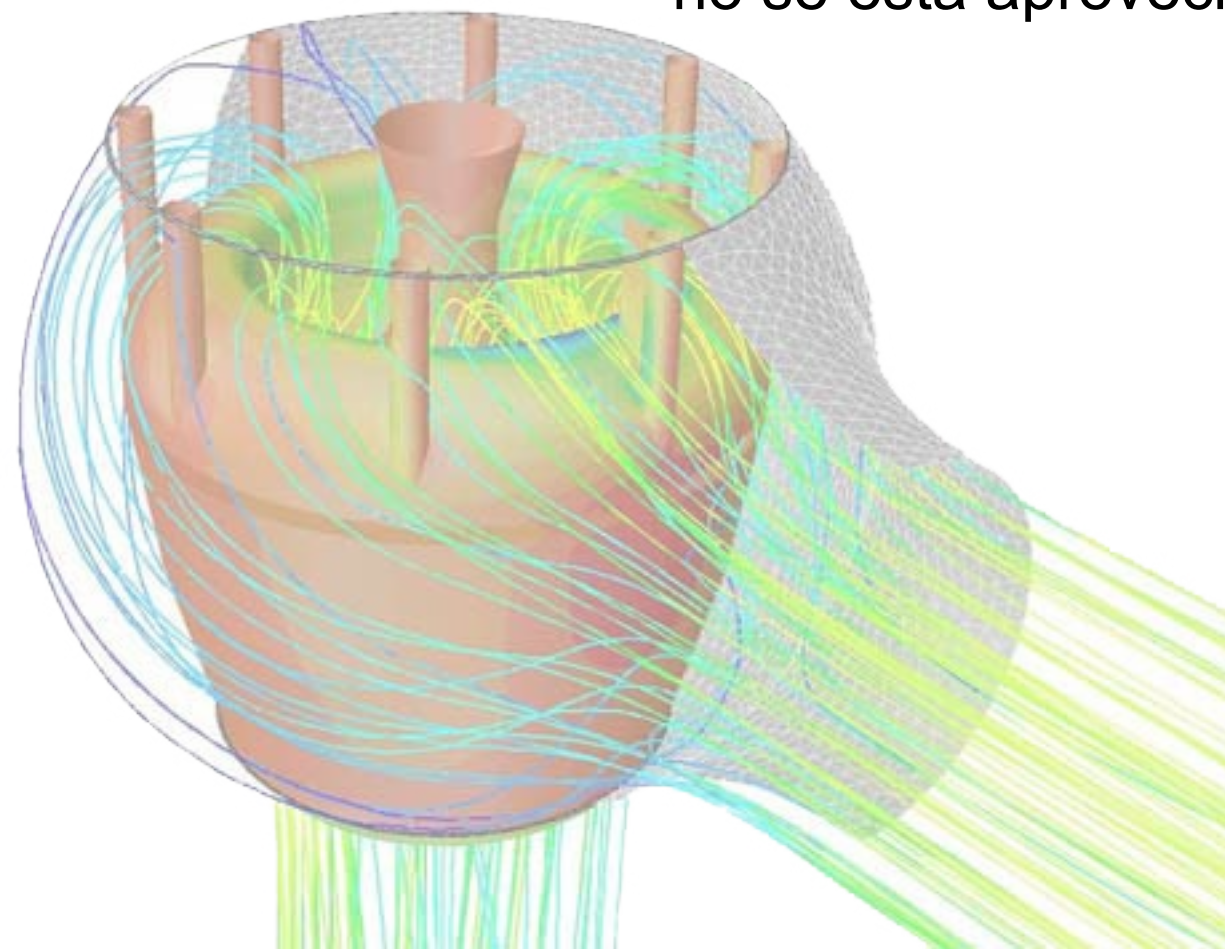
INTRODUCCIÓN

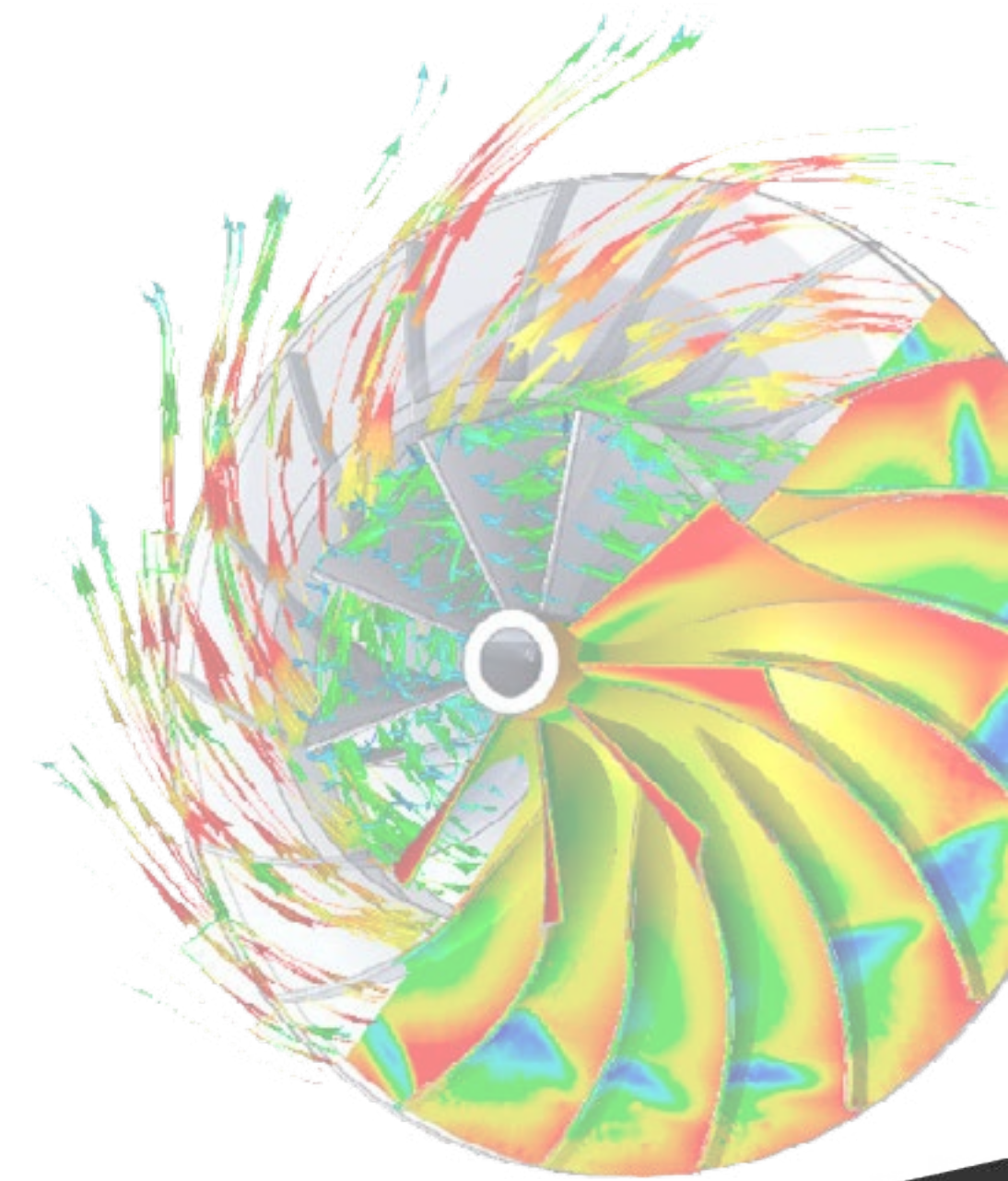
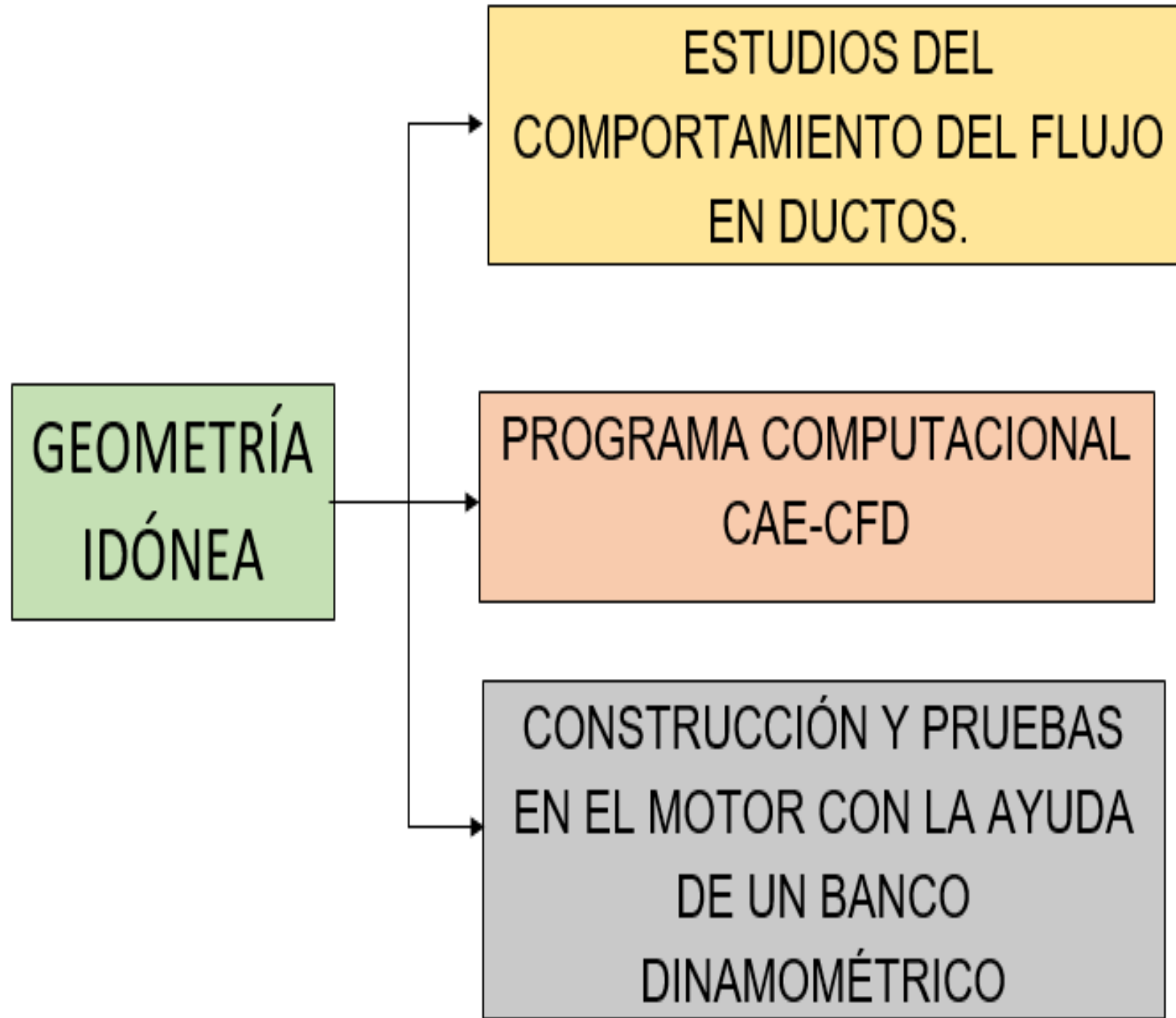
- ➔ La demanda por desarrollar motores cada vez más eficientes y fiables, ha llevado a la industria automotriz a investigar sistemas que produzcan una mejor sincronía en el funcionamiento del motor.
- ➔ El desarrollo del ciclo Otto ha sido y es una función del flujo de aire y de la combustión.
- ➔ Los Colectores de escape de alto rendimiento, tienen como objetivo lograr que el motor expulse los gases de escape lo más rápido posible y sin producir contrapresiones.





- ➔ Lograr un colector de escape equilibrado conlleva estudios de los diferentes aspectos y parámetros físicos como: dimensiones, materiales y geometría.
- ➔ Diseños de colectores de escape de alto rendimiento han profundizado más los estudios al variar sus dimensiones que la geometría
- ➔ Al obtener los colectores de escape, con las dimensiones correctas pero sin la geometría idónea, no se está aprovechando su eficiencia máxima.

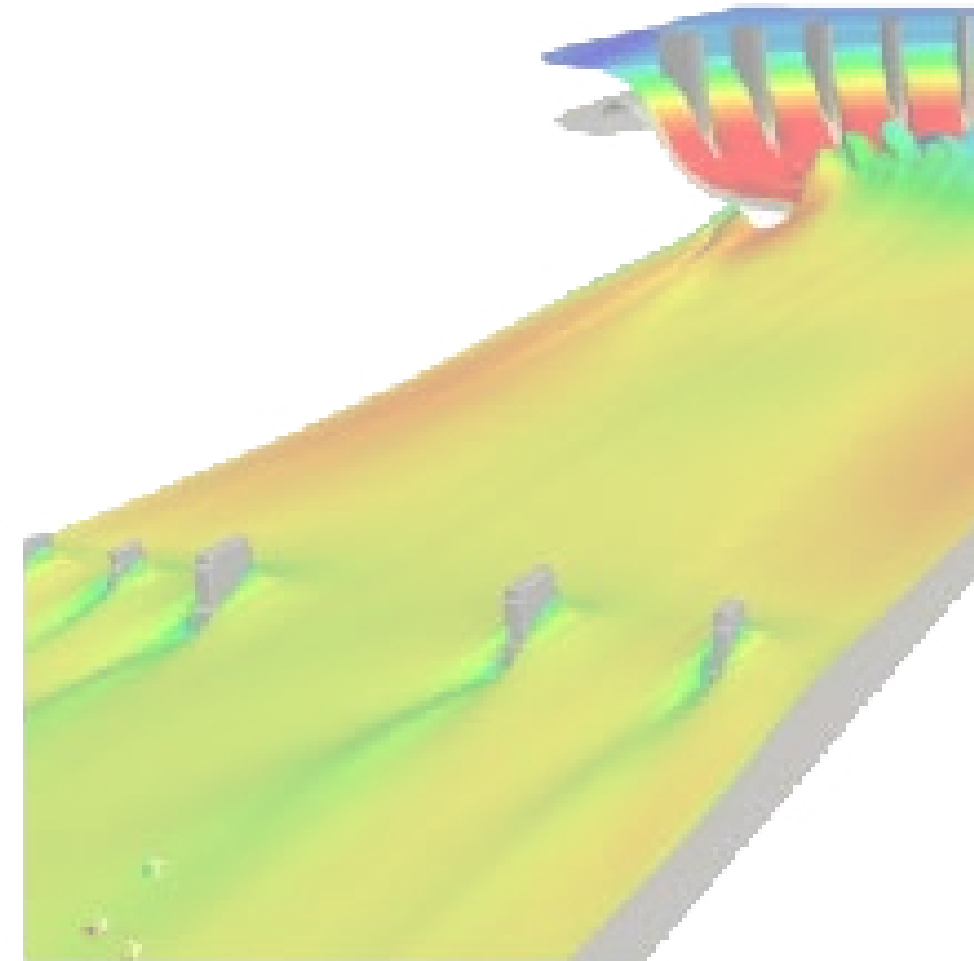






JUSTIFICACIÓN

- ➔ Pretende incrementar la eficiencia mecánica del motor.
- ➔ Conocimiento científico sobre un diseño ingenieril en nuestro medio.
- ➔ Propone el análisis profundo del elemento, para determinar los parámetros que se involucran en el diseño de múltiples de escape
- ➔ Adaptabilidad de una metodología matemática y computacional



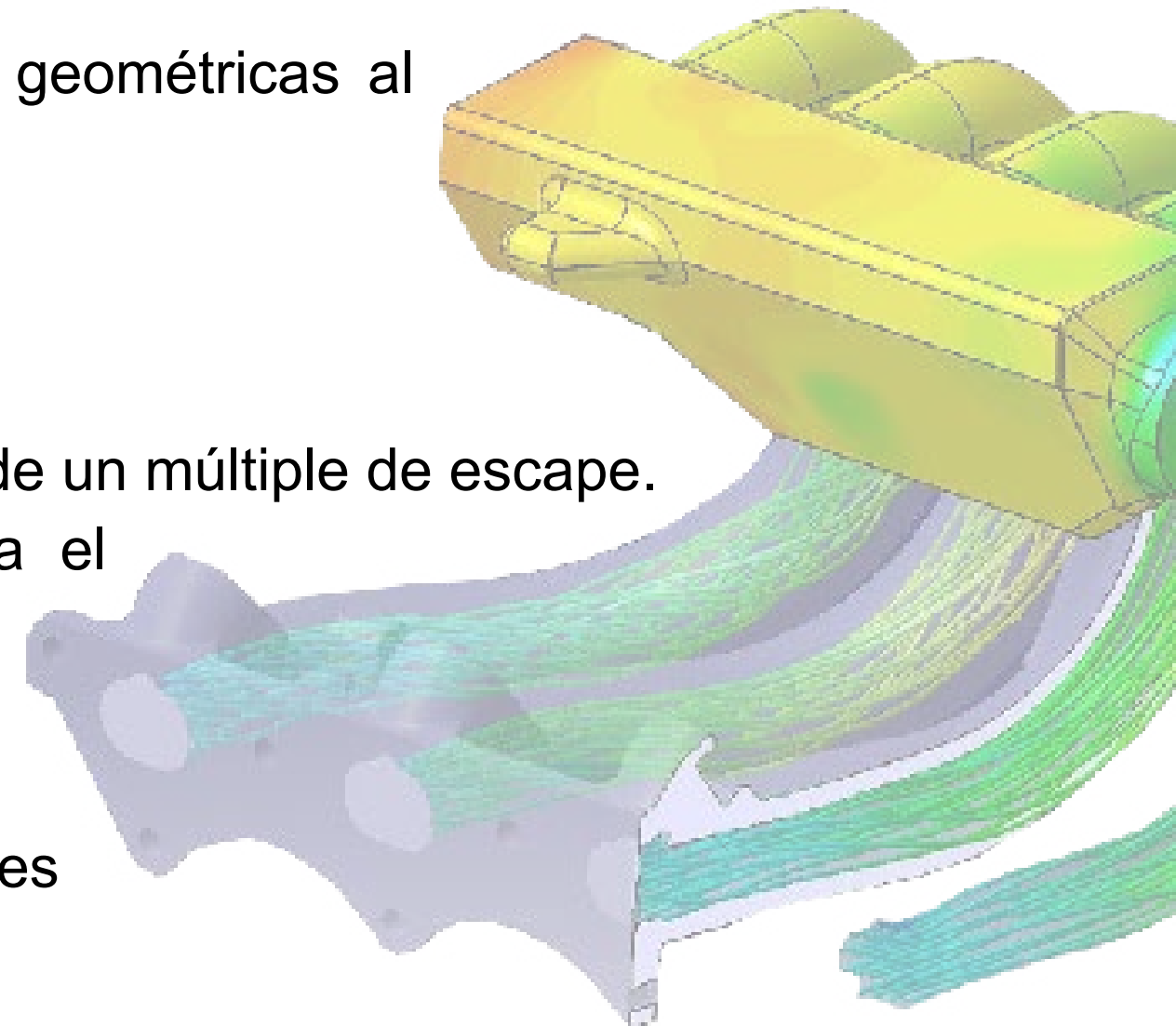


OBJETIVO GENERAL

Investigar la variación de torque y potencia al realizar modificaciones geométricas al colector de escape en el motor Volkswagen de 1.8 litros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

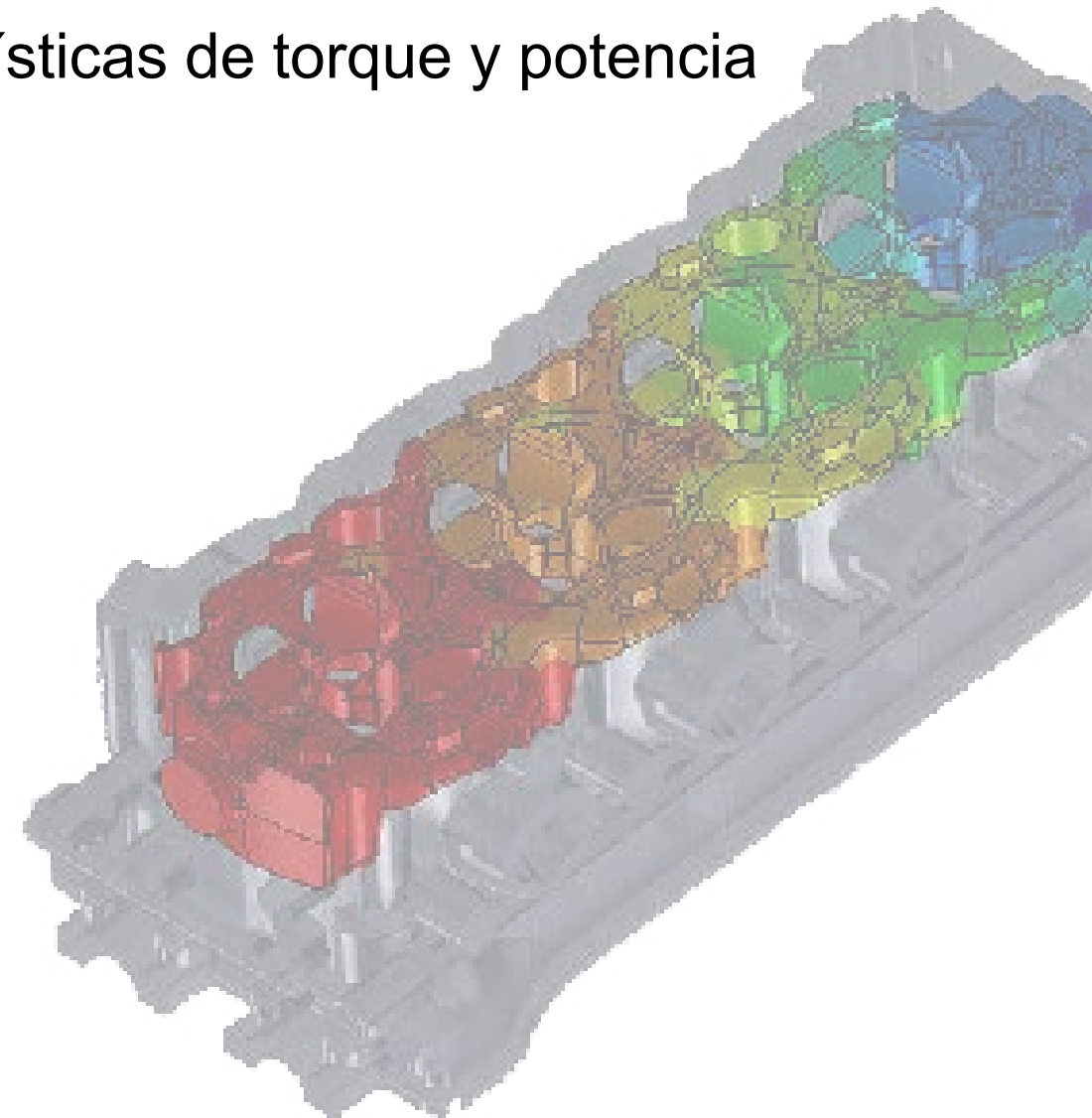
- Investigar todas las variables termo mecánicas que conlleva el diseño de un múltiple de escape.
- Delimitar el espacio físico que se posee alrededor del motor para el acoplamiento del nuevo sistema.
- Diseñar y dimensionar los diferentes prototipos de colectores de escape.
- Construir las distintas alternativas a ser analizadas.
- Evaluar analíticamente y computacionalmente los distintos prototipos de colectores de escape.
- Analizar los resultados obtenidos.





HIPÓTESIS

- ➔ La geometría del colector de escape incide en la curva característica de torque del motor.
- ➔ La geometría del colector de escape incide en la curva característica de potencia del motor.
- ➔ Al variar la geometría del colector de escape no varían las curvas características de torque y potencia del motor.

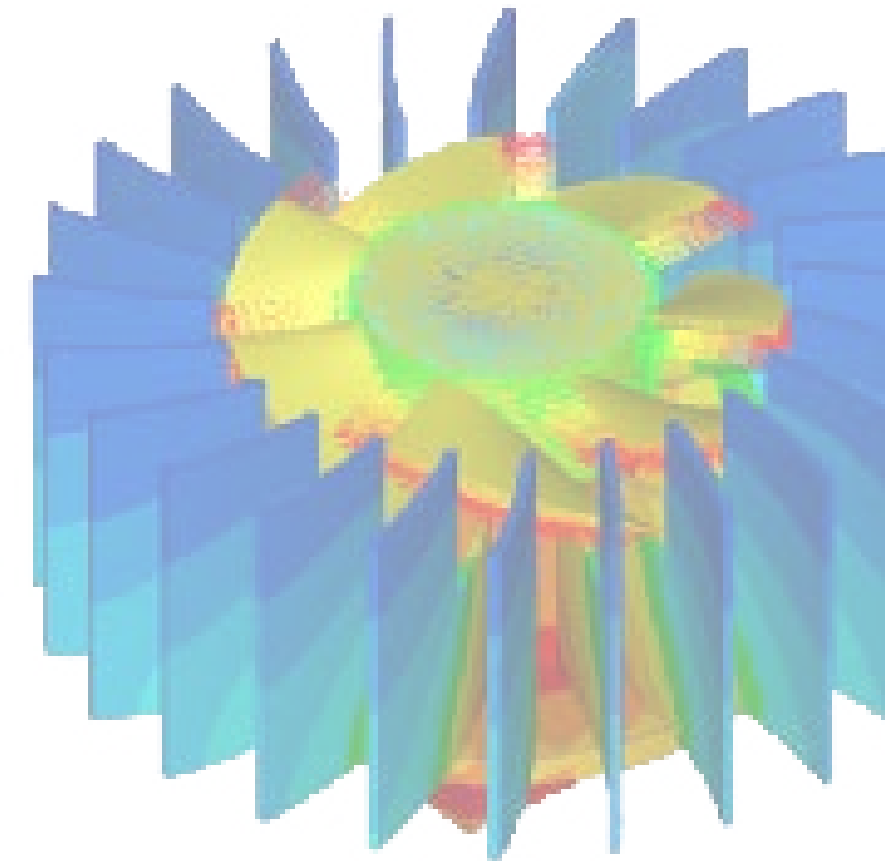
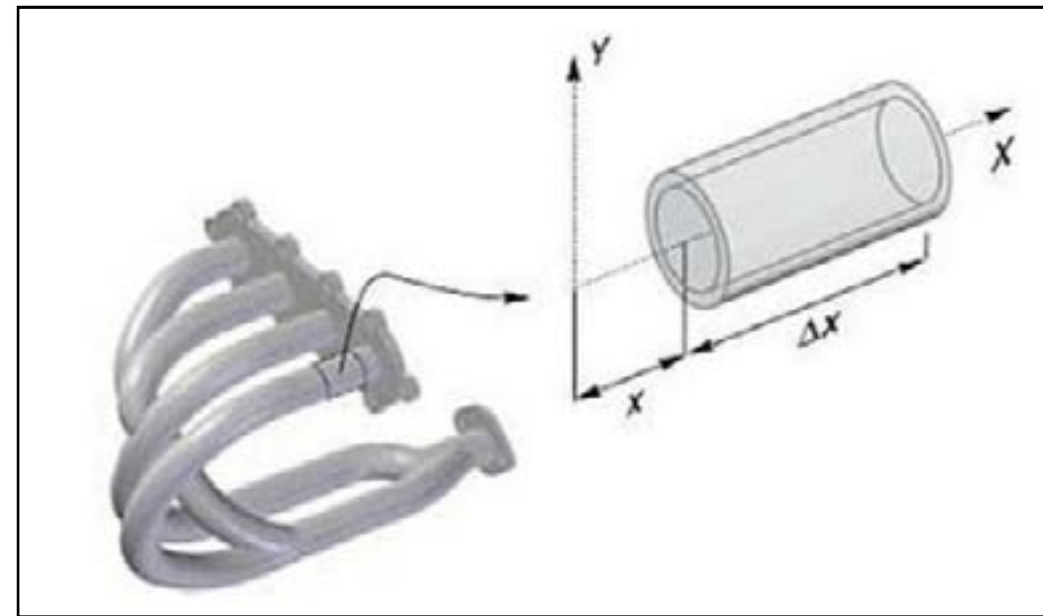




REFERENTES TEÓRICOS

ECUACIONES DE TRANSPORTE

- ➔ Para analizar el comportamiento del flujo en el colector de escape, se emplean las ecuaciones generales de Navier Stokes
- ➔ Este modelo matemático describe el comportamiento del flujo Compresible.
- ➔ Realiza el estudio del fluido mediante un volumen de control.





REFERENTES TEÓRICOS

ECUACIONES DE TRANSPORTE

Conservación de la masa

Esta ecuación expresa un balance de flujos másicos en el volumen de control.

$$\frac{d(\rho)}{dt} + \frac{d(\rho u)}{dx} = 0$$

ρ : Densidad Kg/m³

u : Velocidad m/s

t : Tiempo Seg.

x : Coordenada m

Conservación de la cantidad de movimiento

Esta ecuación expresa un balance de la cantidad de movimiento lineal en el volumen de control

$$\frac{d(\rho u)}{dt} + \frac{d(\rho u)u}{dx} + \frac{d(p)}{dx} + \frac{\tau \pi D}{A} = 0$$

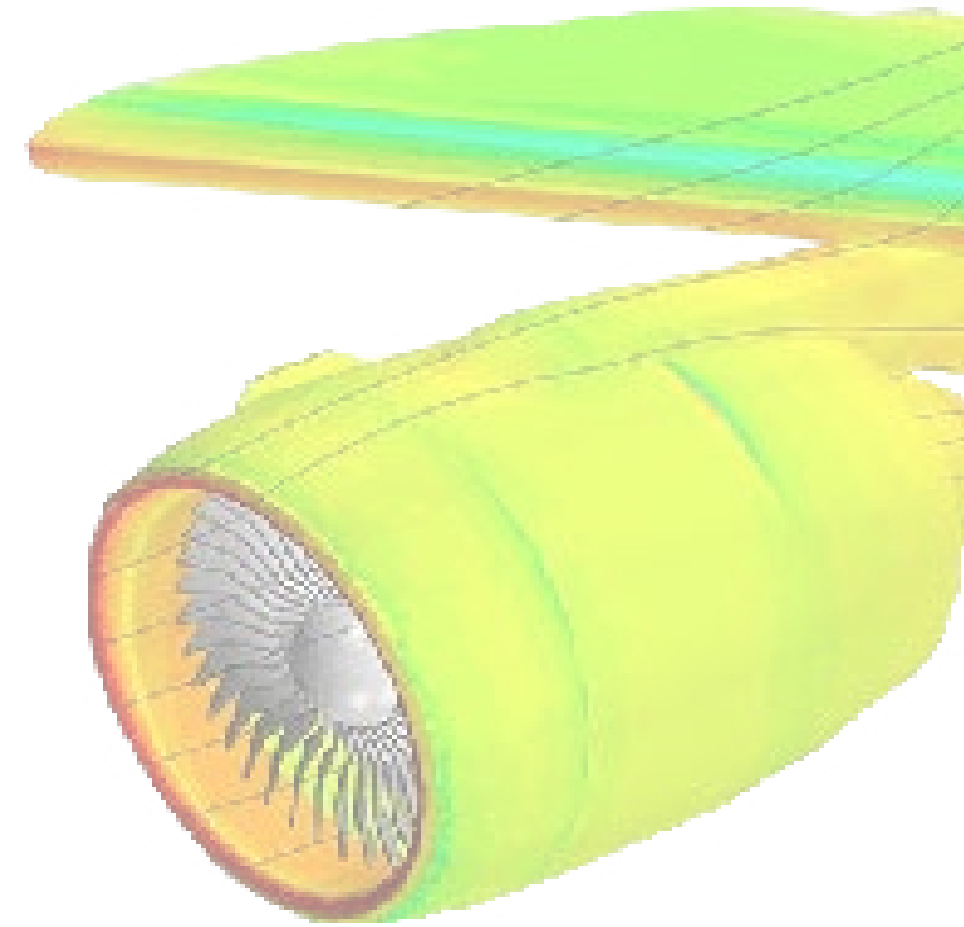
p : Presión Pa.

τ : Esfuerzo Viscoso Pa.*s

D : Diámetro m

A : Área m²

π : Relación de presiones entre el cilindro y el conducto





Conservación de la energía

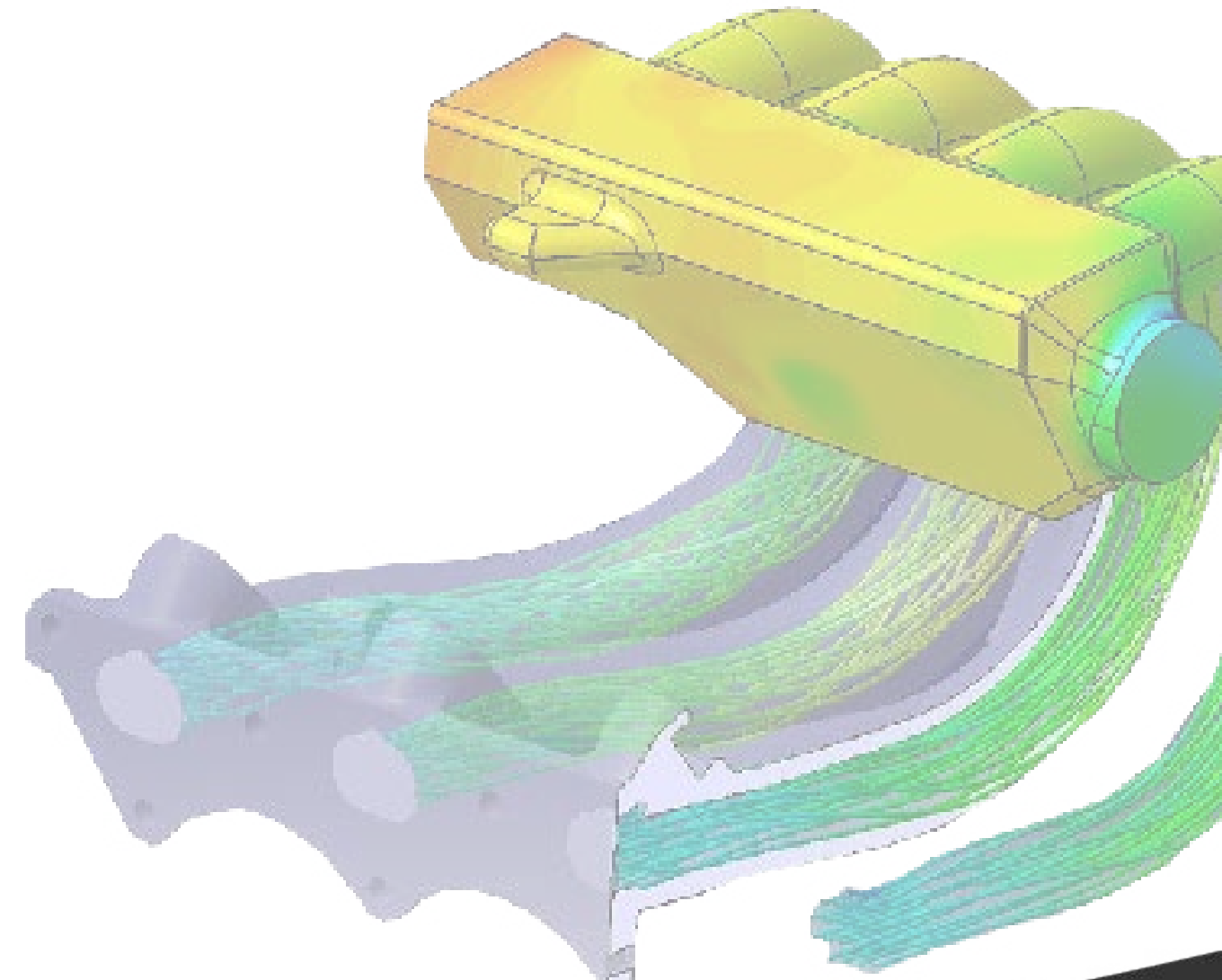
Representa un balance, ahora expresado por la primera ley de la termodinámica.

$$\frac{d(\rho e_o)}{dt} + \frac{d(\rho u h_o)u}{dx} + \frac{d(p)}{dx} + \frac{q}{A\Delta x} = 0$$

q: Calor transferido por convección Watts

e_o: Energía interna J/kg

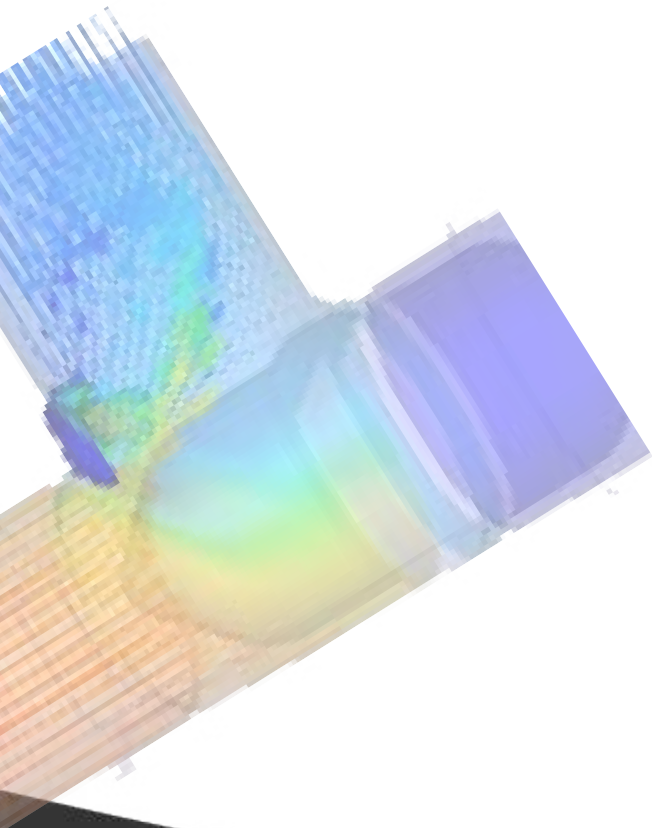
h_o: Entalpía J/kg





GENERACIÓN DE LOS DIBUJOS 3D DE LOS COLECTORES

- Se propone cinco tipos diferentes de geometría, cuatro de ellas definidas por la función raíz y una de ellas definida por la función de la circunferencia.
- Cada función se delimita en un dominio de 0 a 10 cm y en un rango máximo de 0 a 15cm de acuerdo al espacio físico alrededor del motor, para lo cual cada función raíz es multiplica por un valor de 4cm.

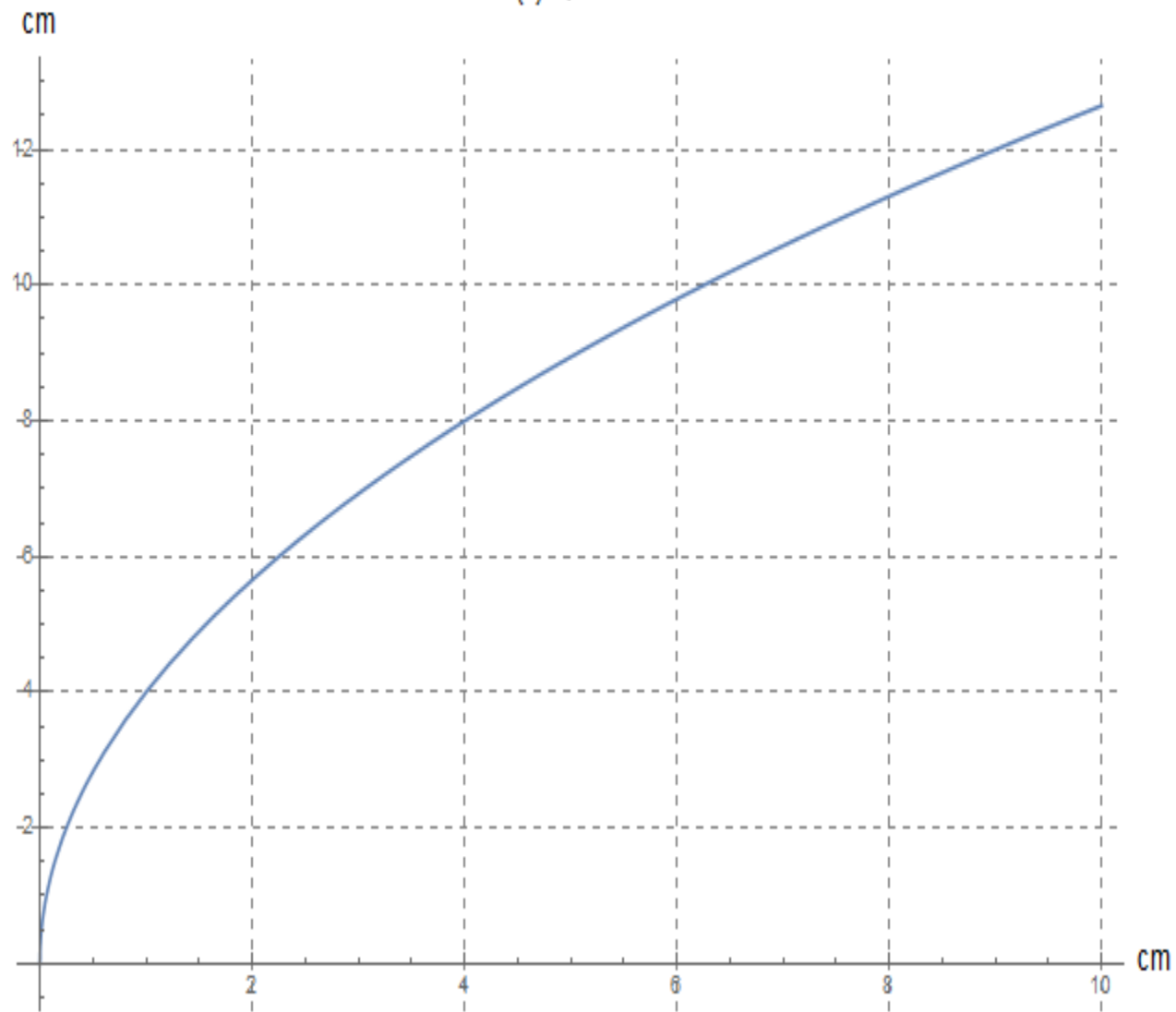




GENERACIÓN DE LOS DIBUJOS 3D DE LOS COLECTORES COLECTOR N1

$$f(x) = \sqrt{x} * 4$$

$$f(x) = \sqrt{x} + 4$$

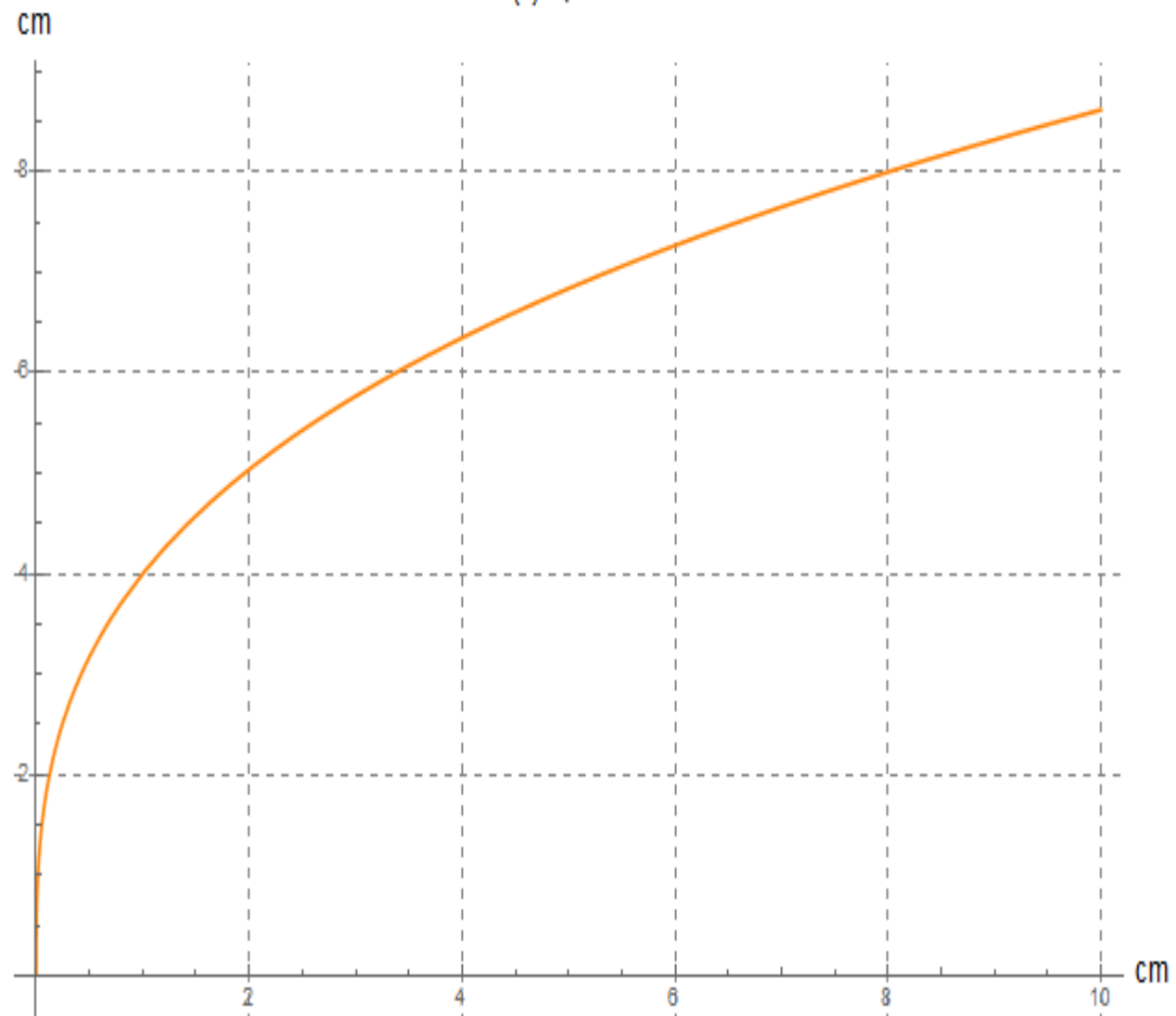




GENERACIÓN DE LOS DIBUJOS 3D DE LOS COLECTORES COLECTOR N2

$$f(x) = \sqrt[3]{x} * 4$$

$$f(x) = \sqrt[3]{x} * 4$$

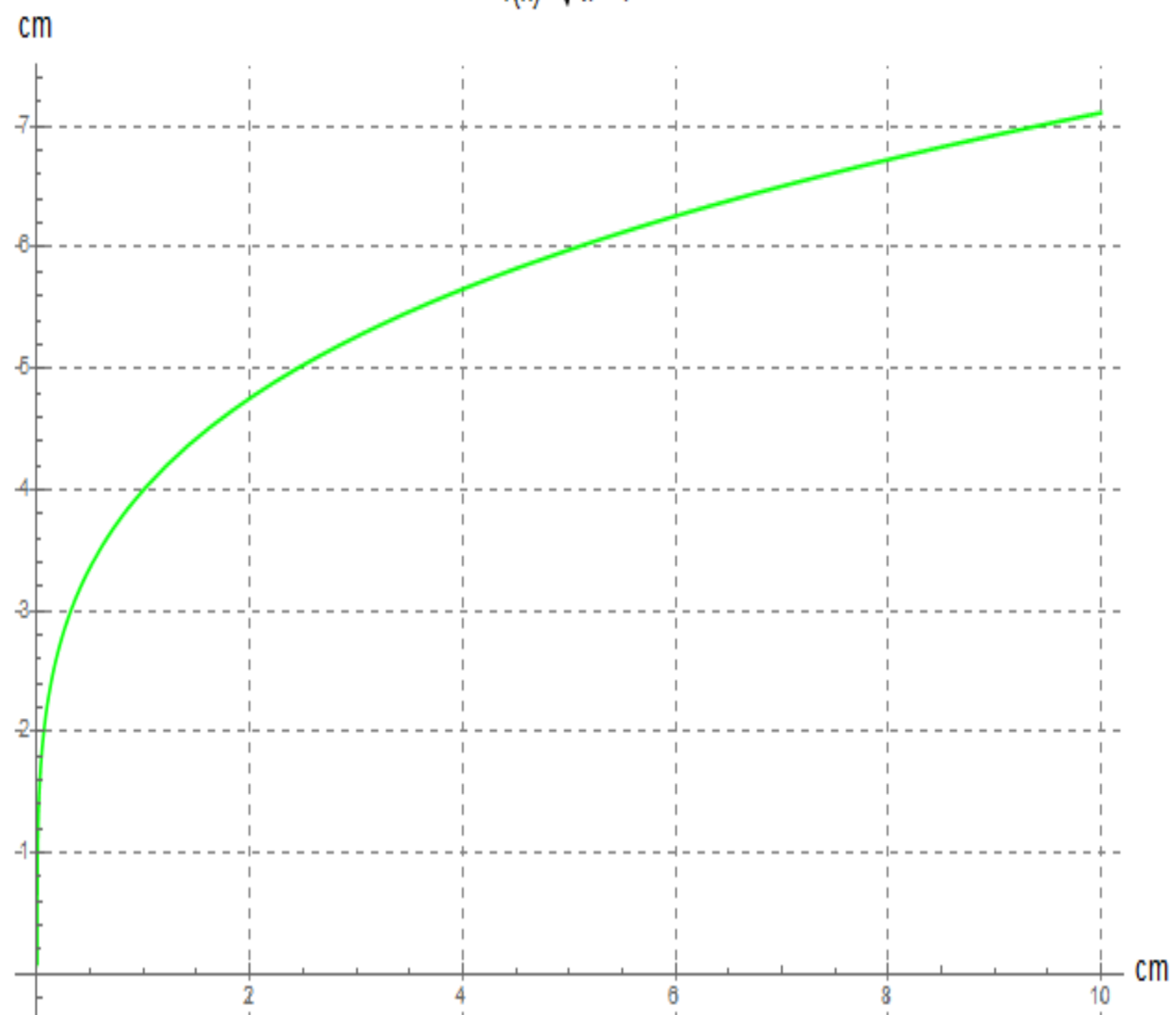




GENERACIÓN DE LOS DIBUJOS 3D DE LOS COLECTORES COLECTOR N3

$$f(x) = \sqrt[4]{x} * 4$$

$$f(x) = \sqrt[4]{x} * 4$$

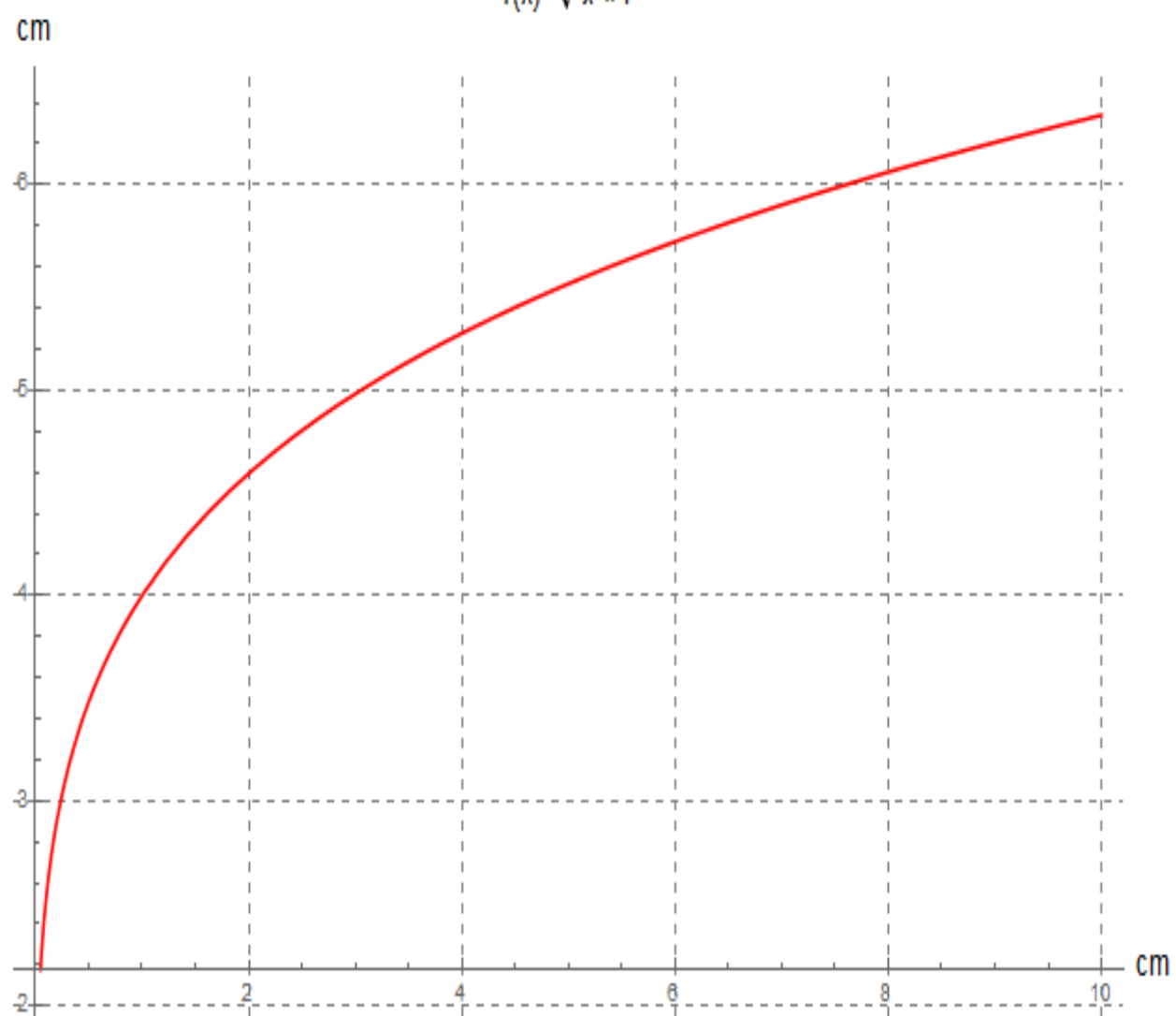




GENERACIÓN DE LOS DIBUJOS 3D DE LOS COLECTORES COLECTOR N4

$$f(x) = \sqrt[5]{x} * 4$$

$$f(x) = \sqrt[5]{x} * 4$$



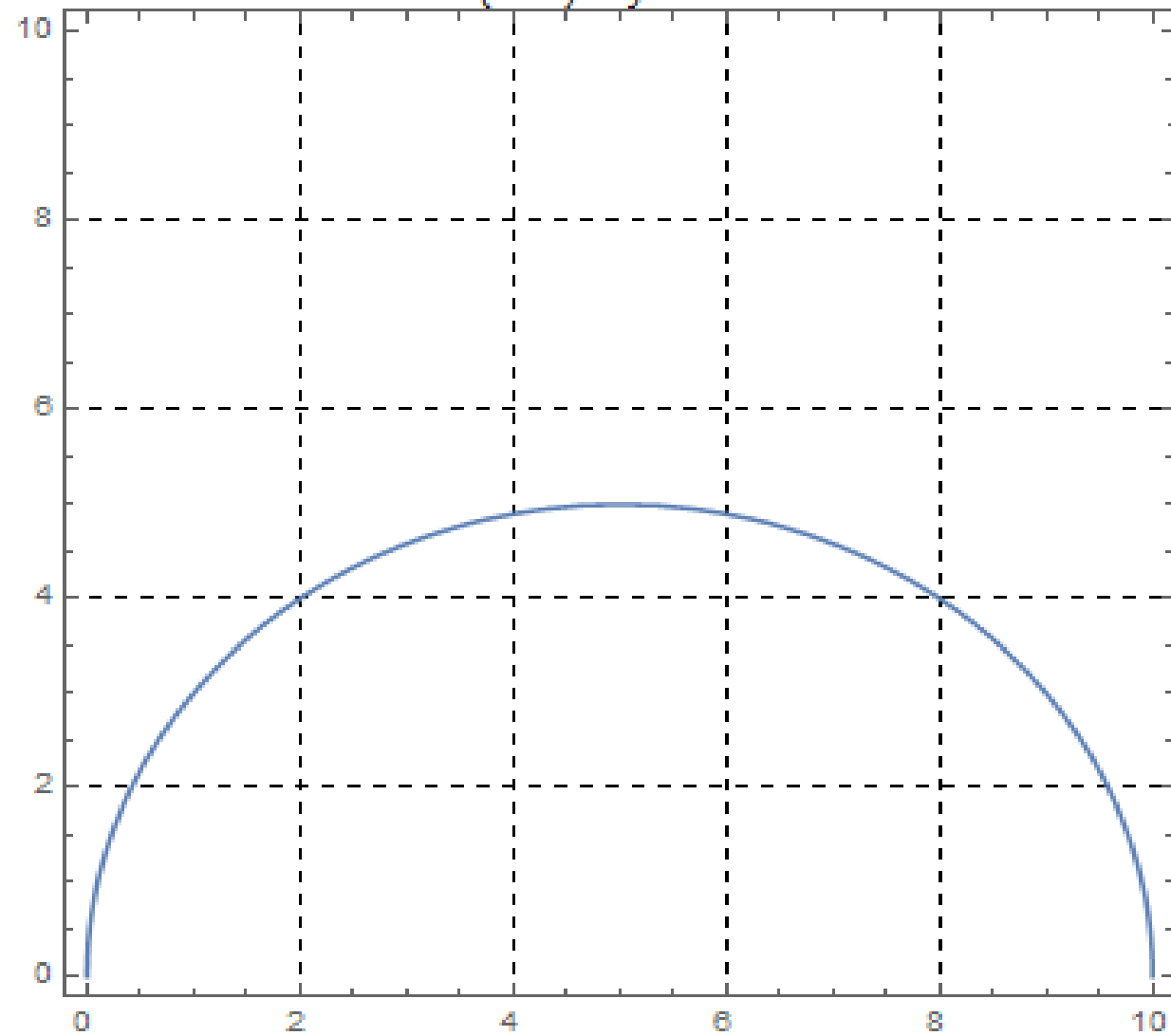


GENERACIÓN DE LOS DIBUJOS 3D DE LOS COLECTORES

COLECTOR N5

$$(x-5)^2 + y^2 = 25$$

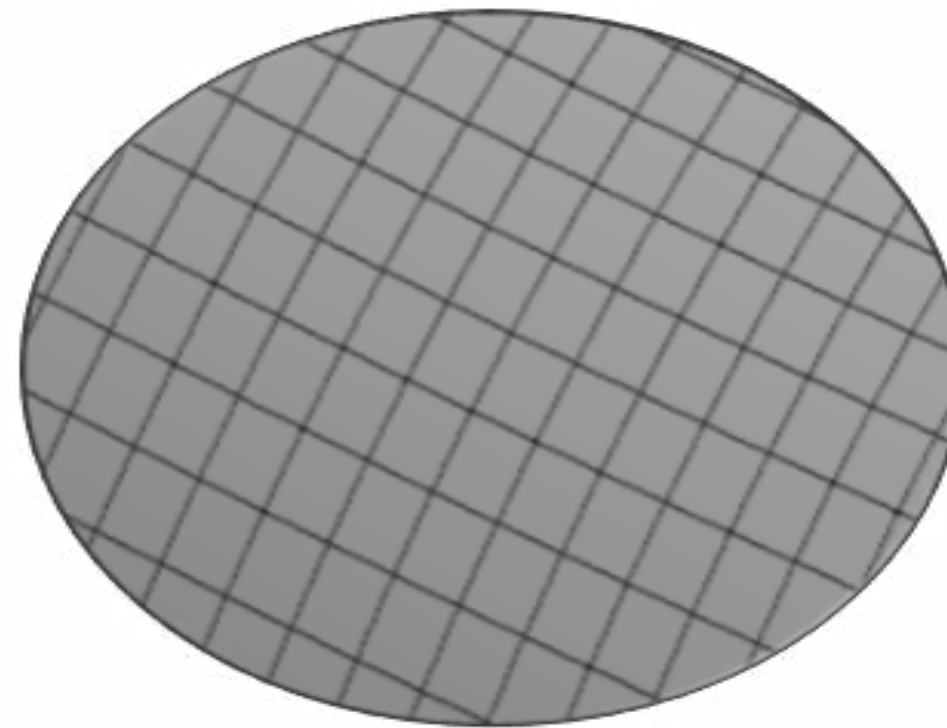
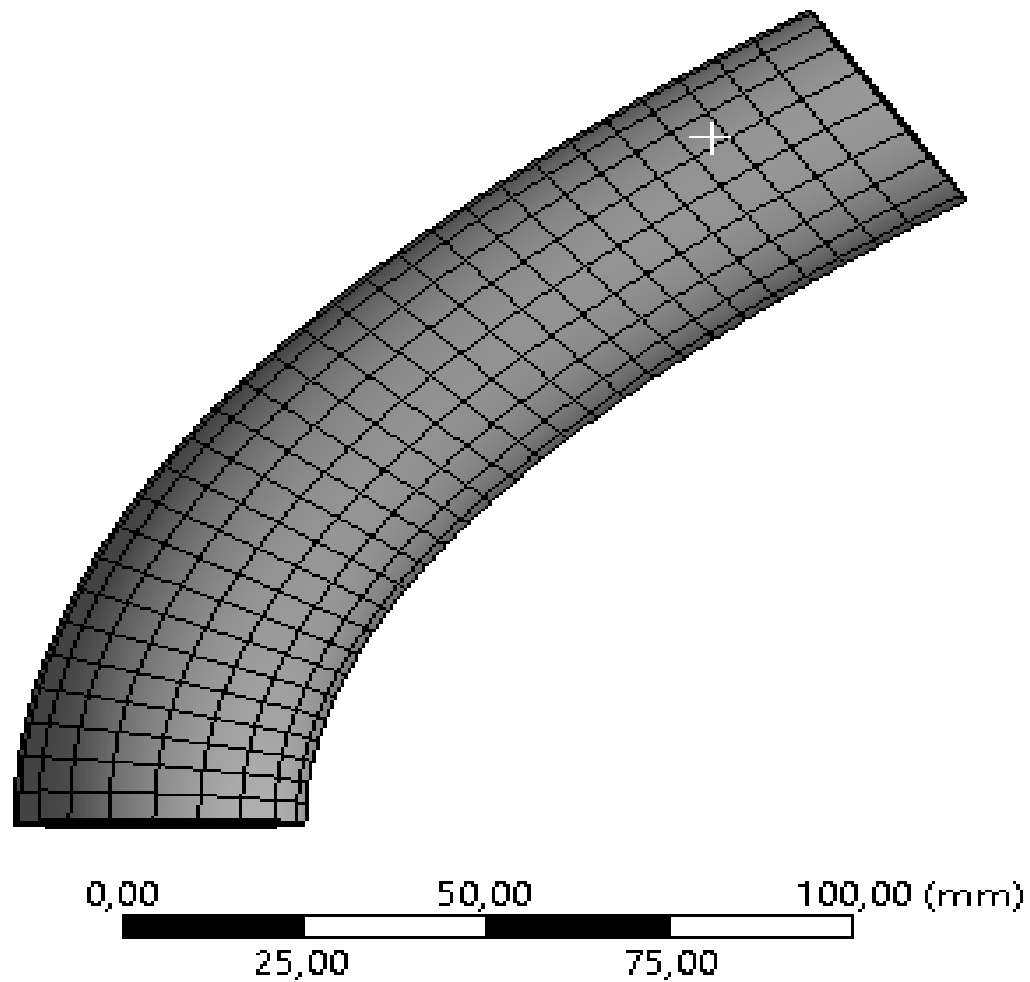
$$(x-5)^2 + y^2 = 25$$





DISEÑO DE MALLA

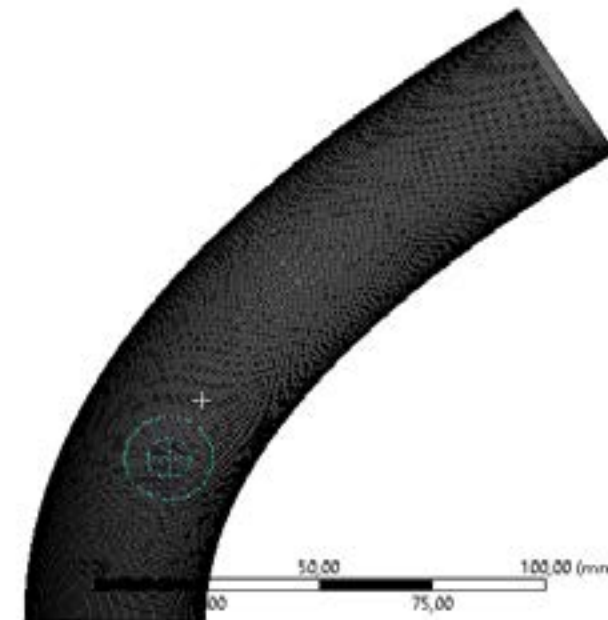
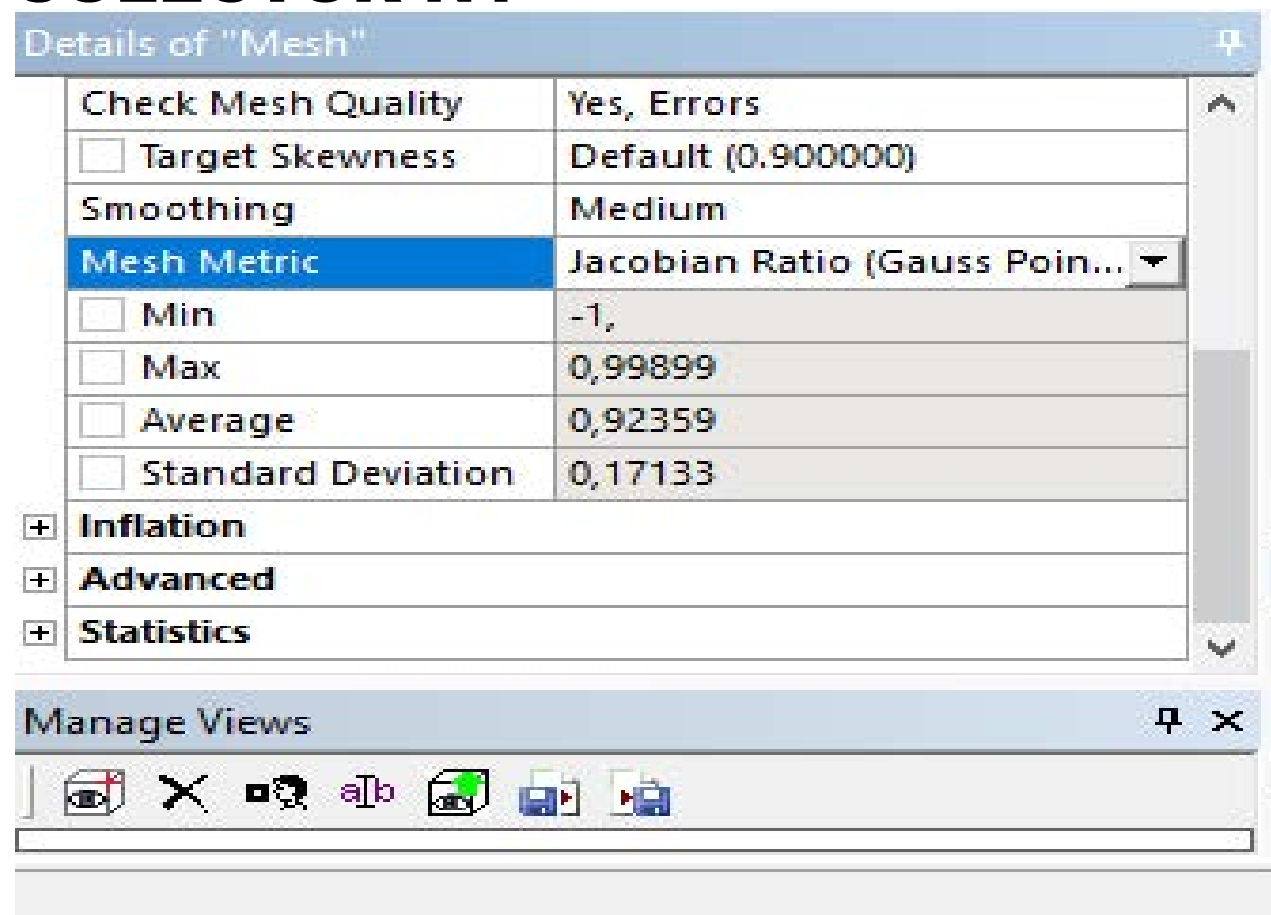
ANSYS CFX incorpora un mallado semiautomático con lo cual resulta rápido generar una malla de tetraedros y hexaedros.



VERIFICACIÓN DE MALLA

- Jacobian Ratio (Puntos de Gauss)
- Para definir la métrica del mallado se delimita por -1 (peor) y 1 (mejor).

COLECTOR N1



Descripción	Valor
Jacobian Ratio	0.92359
Tamaño del elemento	0,8mm



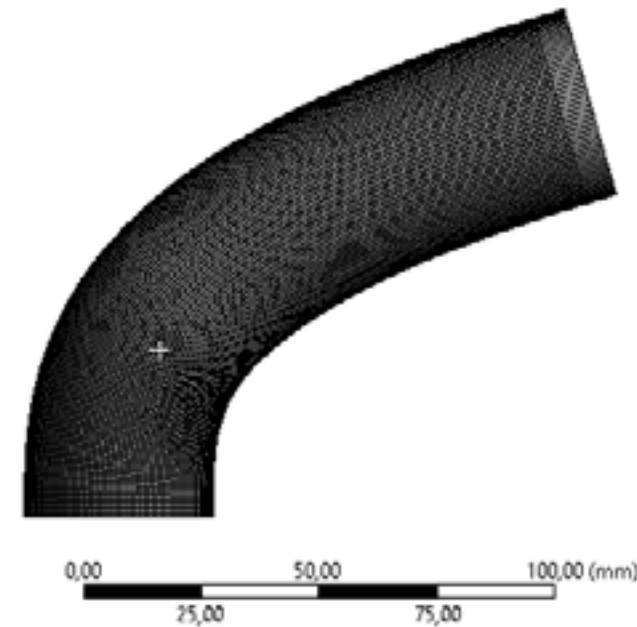
VERIFICACIÓN DE MALLA

COLECTOR N2

Details of "Mesh"

+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Jacobian Ratio (Gauss Points)
<input type="checkbox"/> Min	-1,
<input type="checkbox"/> Max	0,99995
<input type="checkbox"/> Average	0,92549
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,14522
- Inflation	

Manage Views








Descripción	Valor
Jacobian Ratio	0.92549
Tamaño del elemento	1mm




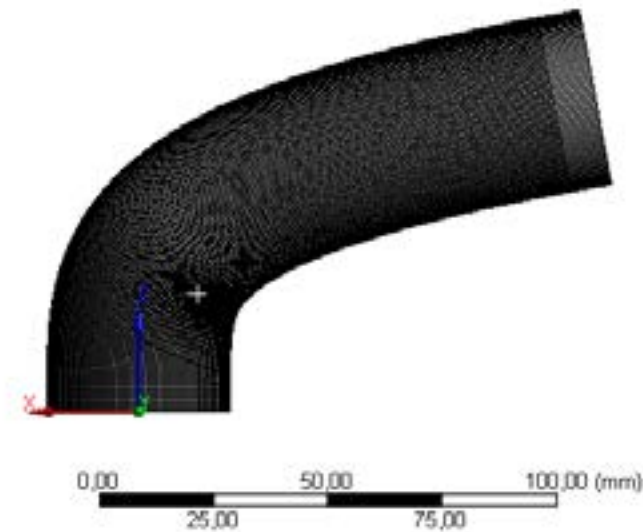
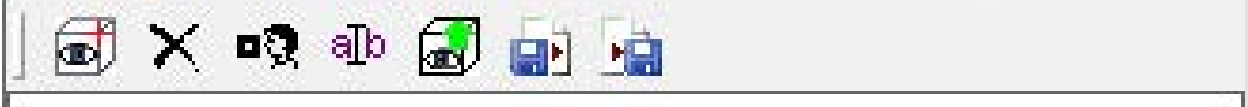
VERIFICACIÓN DE MALLA

COLECTOR N3

Details of "Mesh" 

Element Midside Nodes	Dropped	
 Sizing		
 Quality		
Check Mesh Quality	Yes, Errors	
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)	
Smoothing	Medium	
Mesh Metric	Jacobian Ratio (Gauss Points)	
<input type="checkbox"/> Min	-1,	
<input type="checkbox"/> Max	0,99988	
<input type="checkbox"/> Average	0,93043	
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,16071	

Manage Views 



Descripción	Valor
Jacobian Ratio	0.93043
Tamaño del elemento	0,8mm



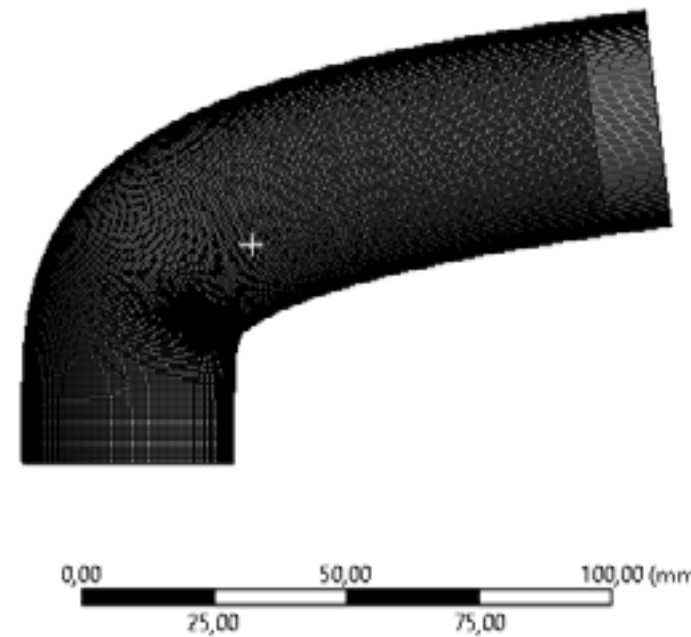
VERIFICACIÓN DE MALLA

COLECTOR N4

Details of "Mesh"

Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Jacobian Ratio (Gauss Points)
<input type="checkbox"/> Min	-1,
<input type="checkbox"/> Max	0,99993
<input type="checkbox"/> Average	0,92823
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,15895

Manage Views



Descripción	Valor
Jacobian Ratio	0.92823
Tamaño del elemento	0,8mm



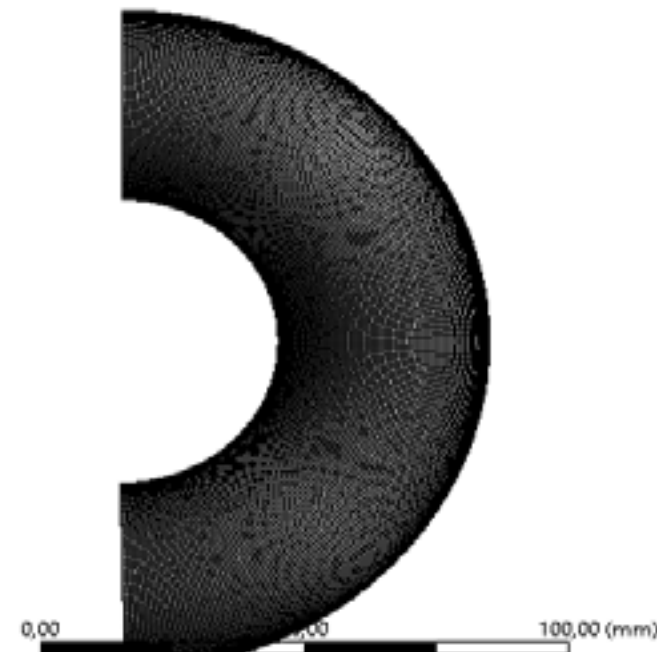
VERIFICACIÓN DE MALLA

COLECTOR N5

Details of "Mesh" ⌵

Element Midside Nodes	Dropped	⬆
+ Sizing		
- Quality		
Check Mesh Quality	Yes, Errors	
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)	
Smoothing	Medium	
Mesh Metric	Jacobian Ratio (Gauss Points)	
<input type="checkbox"/> Min	-1,	
<input type="checkbox"/> Max	0,999	
<input type="checkbox"/> Average	0,92377	
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,15376	⬇

Manage Views ⌵ ✕



Descripción	Valor
Jacobian Ratio	0.92377
Tamaño del elemento	0,8mm



CONDICIONES DE BORDE

Para definir las condiciones de frontera se realiza una plantilla termodinámica según los datos del motor, para el análisis del ciclo ideal Otto se realizó según (Blair, 1999, pp. 86-88)

```

Patm = 70000;
Tatm = 293;
R = 287;
Rc = 10;
γ = 1.333;
cv = 718;
V1 = 4.5 * 10^-4;
m1 = (Patm * V1) / (R * Tatm);
AFR = 14.7;
mf = m1 / AFR;
nc = 0.8;
Cc = 435 * 10^5;
Q = nc * mf * Cc;
P2 = Patm * (1/Rc)^γ;
T2 = Tatm * (1/Rc)^(1-γ);
T3 = T2 + Q / (m1 * cv);
P3 = P2 * T3 / T2;
T4 = T3 * (Rc)^(1-γ);
P4 = P3 * (Rc)^γ;

Print[m1 == m1, Kg]
Print[mComb == mf, Kg]
Print[EComb == Q, Joules]
Print[P20 == P2, Pa]
Print[P20 == P2 / 100000, Bar]
Print[T20 == T2, K]
Print[T30 == T3, K]
Print[P30 == P3, Pa]
Print[P30 == P3 / 100000, Bar]
Print[T40 == T4, K]
Print[P40 == P4, Pa]
Print[P40 == P4 / 100000, Bar]
  
```

```

m1 = 0.000374594Kg
mComb = 0.0000254826Kg
EComb = 886.794Joules
P20 = 1.50695 * 10^5Pa
P20 = 15.0695Bar
T20 = 630.765K
T30 = 3927.91K
P30 = 9.38407 * 10^5Pa
P30 = 93.8407Bar
T40 = 1824.57K
P40 = 435905.Pa
P40 = 4.35905Bar
  
```

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Relación de compresión	10:1
Cilindrada	1781cm ³
Diámetro del cilindro	81mm
Carrera	86.4mm



CONDICIONES DE BORDE

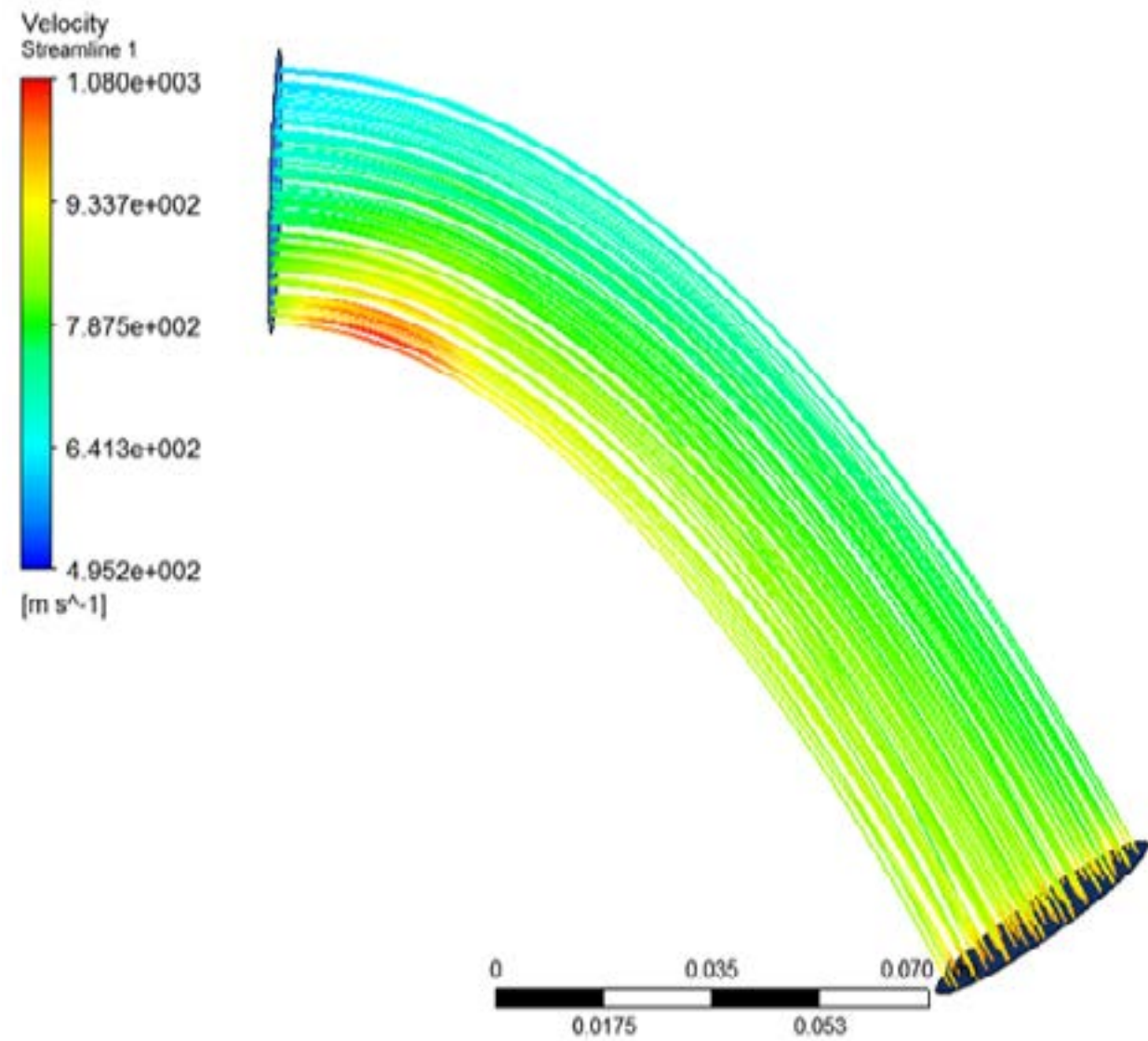
Mediante la plantilla se obtiene las condiciones de frontera:

CONDICIÓN DE FRONTERA	Valor
Presión de escape	4.4 bar
Temperatura de escape	1824,6°K (1551,5°C)
Presión Ambiente	1 atm
Temperatura Ambiente	300°K (26,9°C)

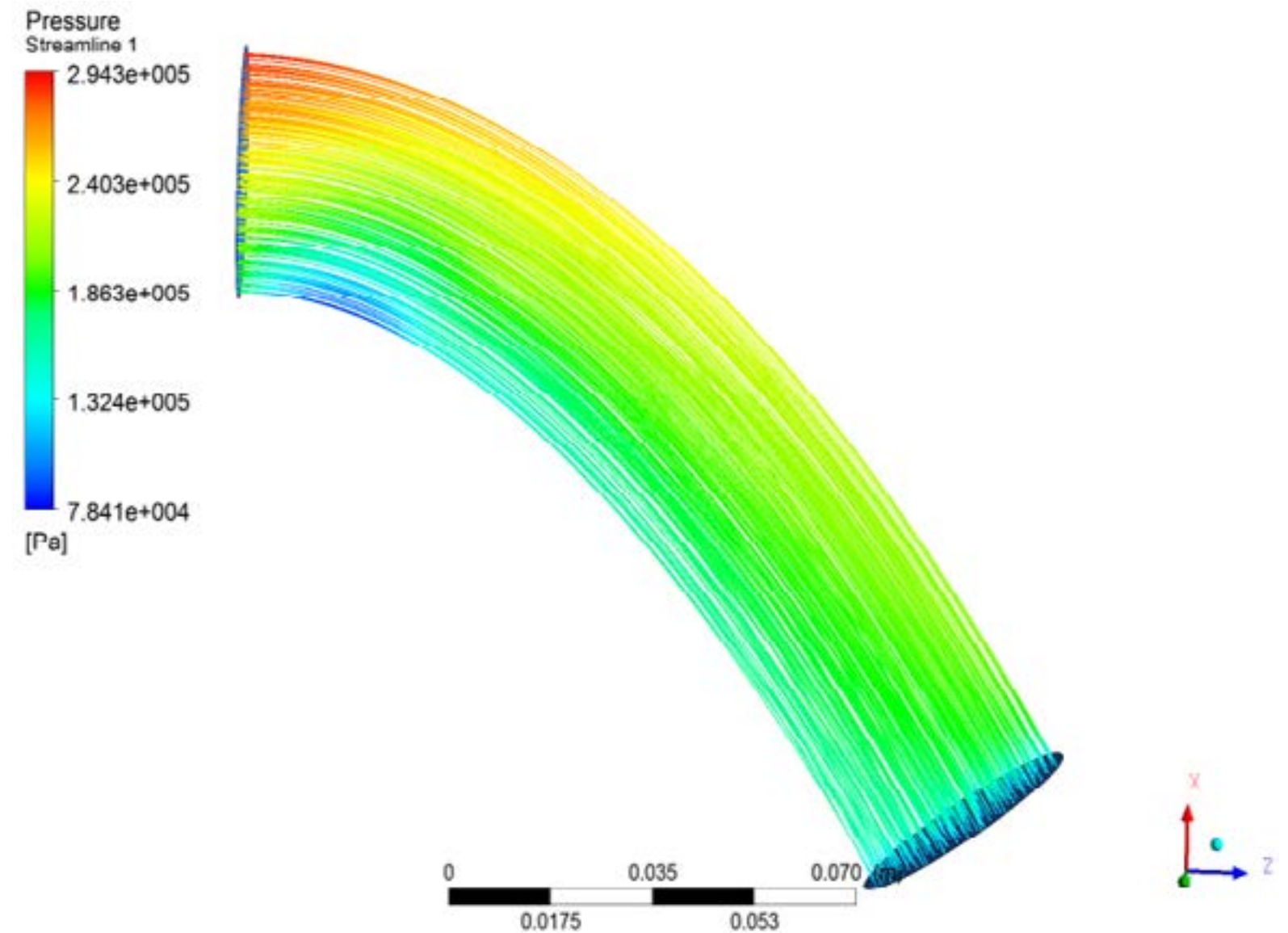


POST PROCESO

Resultados Colector N1



Velocidad Max. 1080 m/s Min. 495.2 m/s

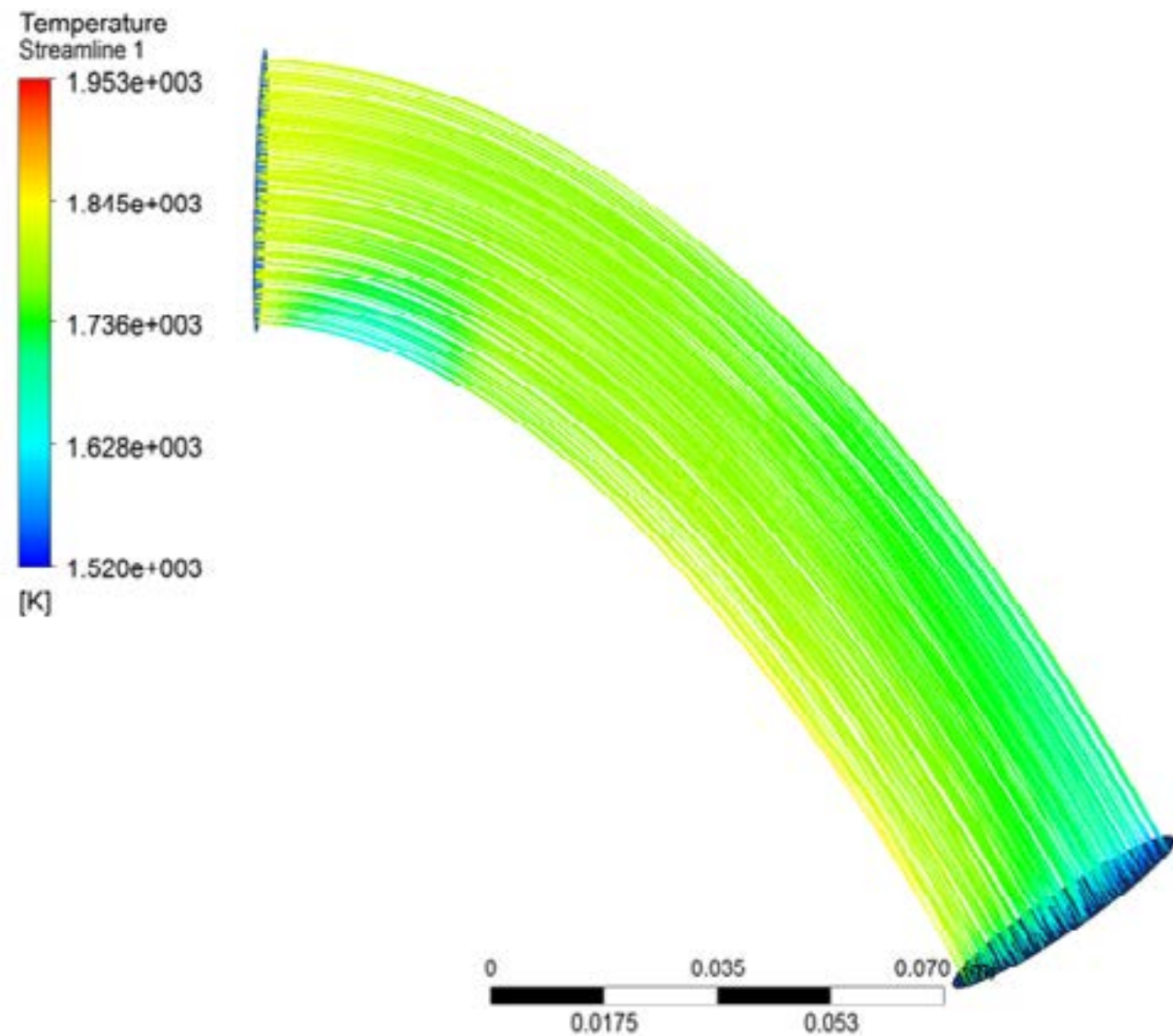


Presión Max. 2.943 bar Min. 0.7841 bar

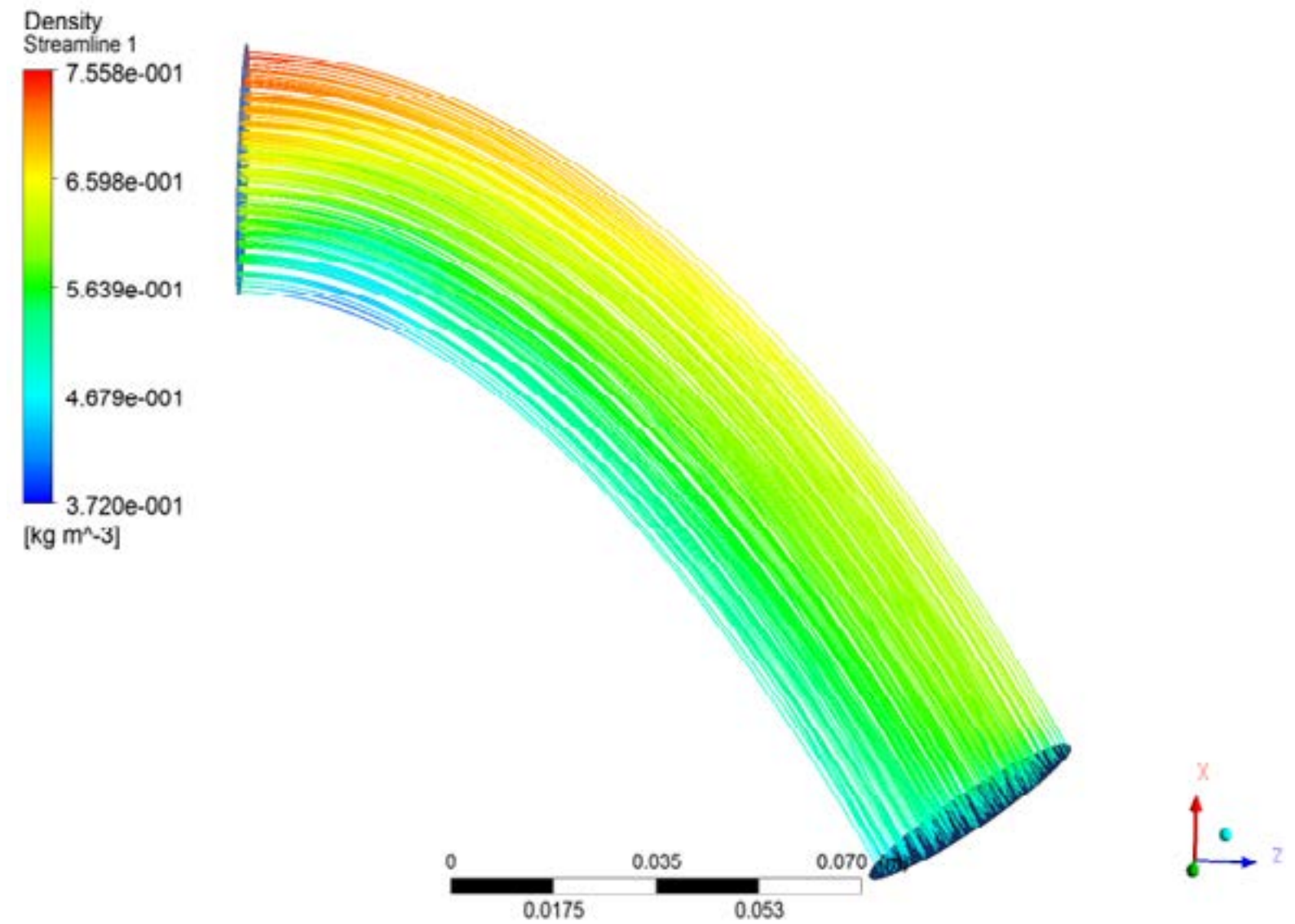


POST PROCESO

Resultados Colector N1



Temperatura Max. 1953°K (1679.9°C)
Min. 1520°K (1246.9°C)

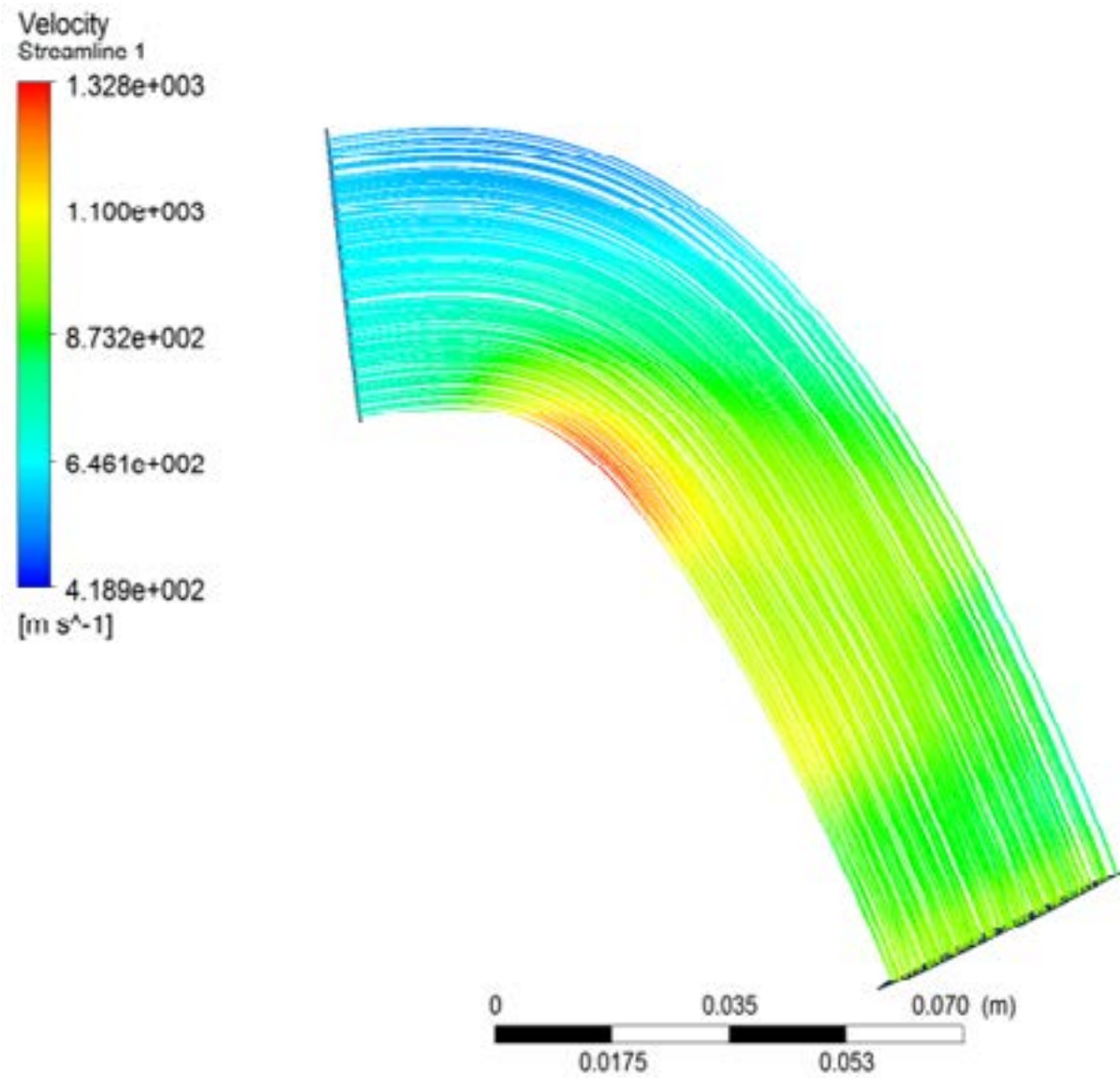


Densidad Max. 0.7558 Kg/m3 Min. 0.372 Kg/m3

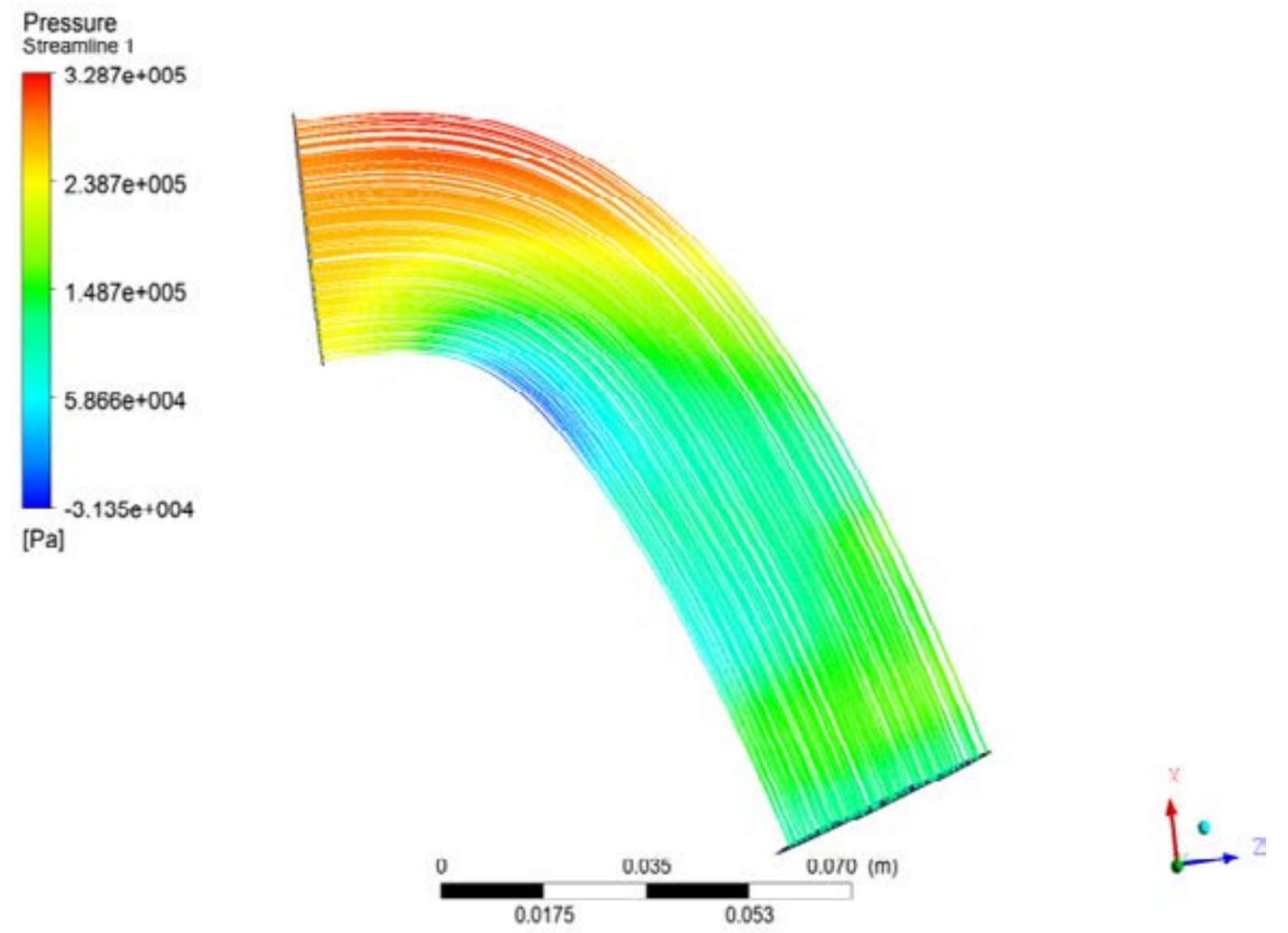


POST PROCESO

Resultados Colector N2



Velocidad Max. 1328 m/s Min. 418.9 m/s

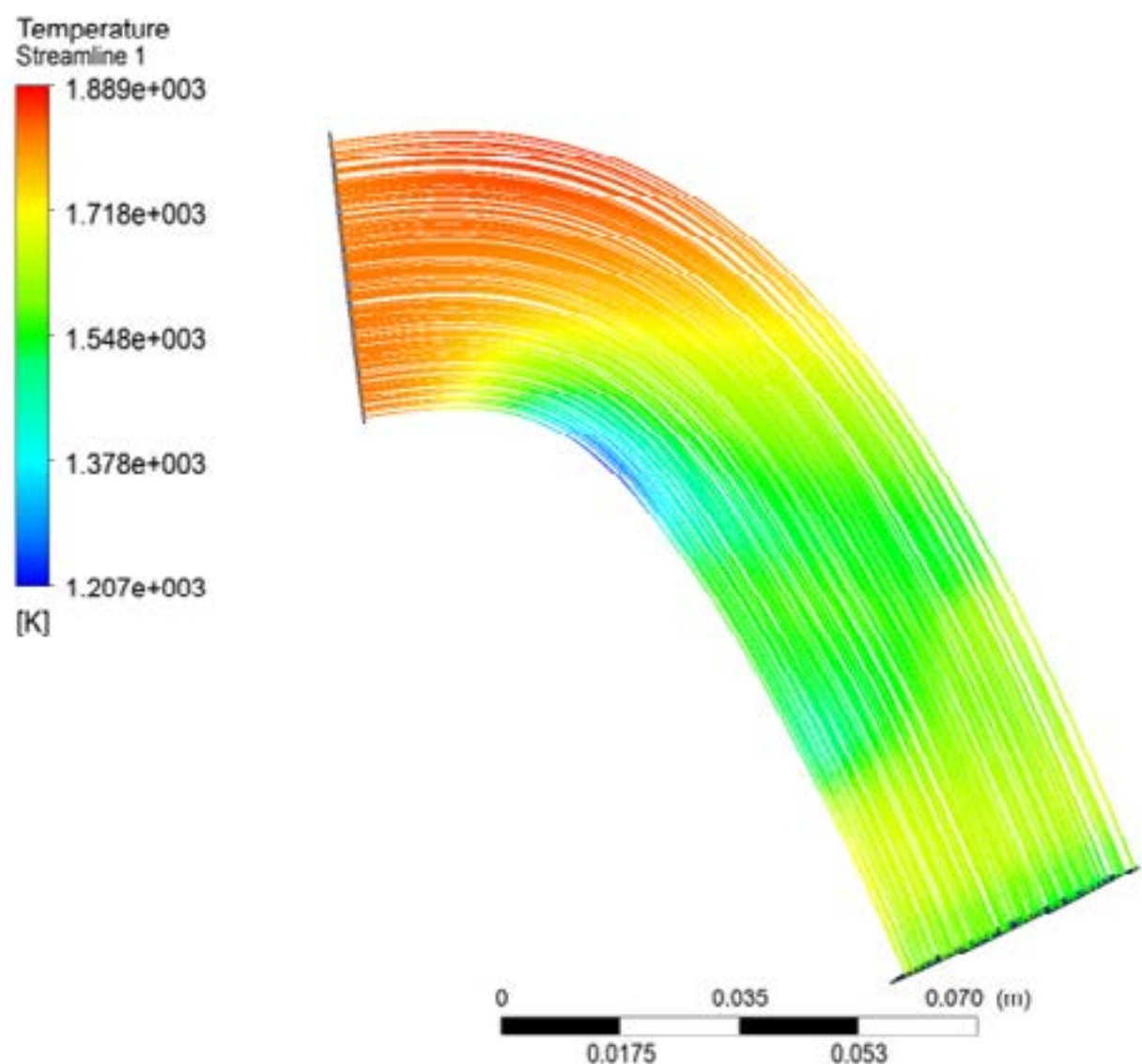


Presión Max. 3.287 bar Min. -0.3135 bar

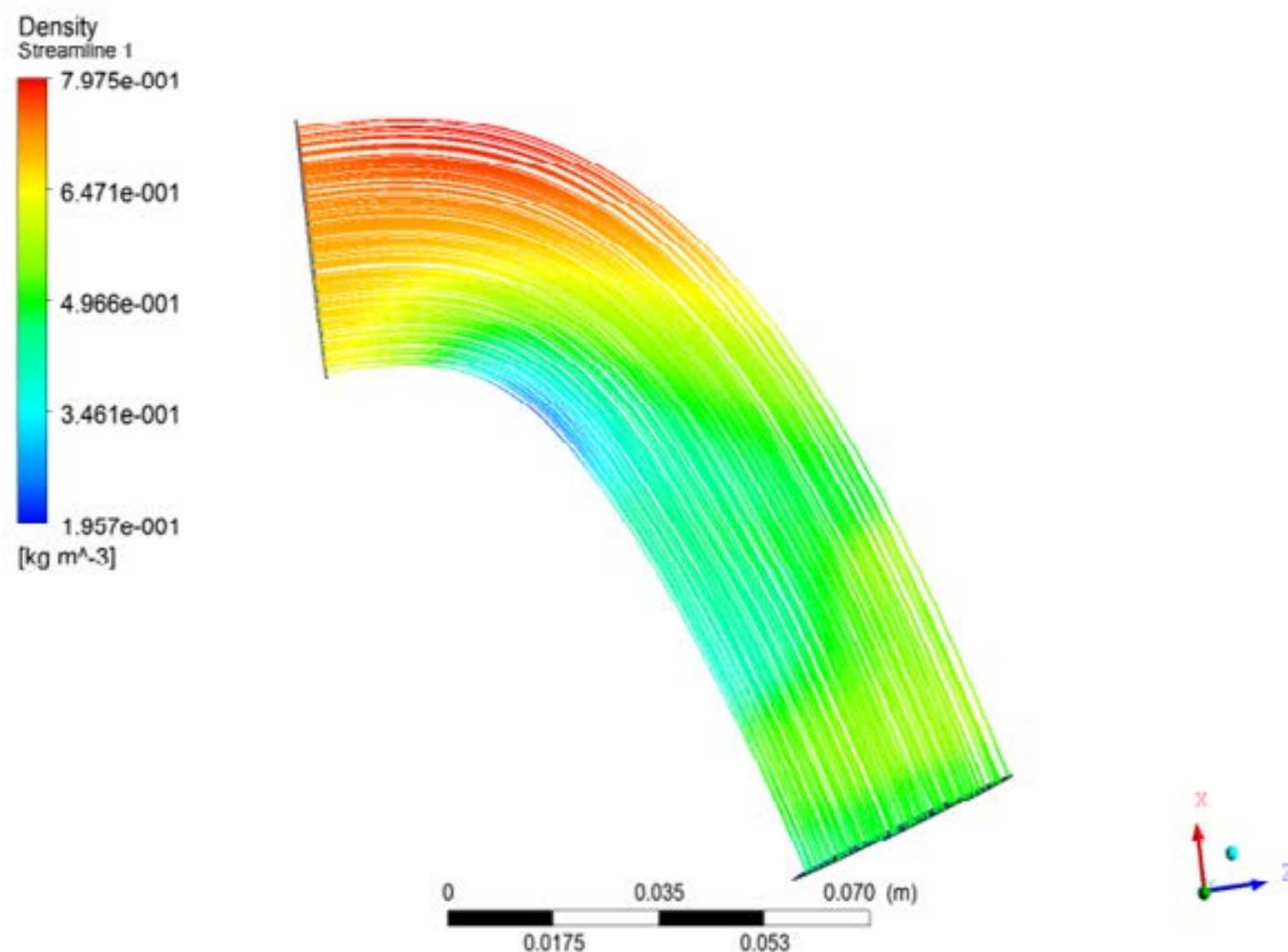


POST PROCESO

Resultados Colector N2



**Temperatura Max. 1889°K (1615.9°C)
Min. 1207°K (933.9°C)**

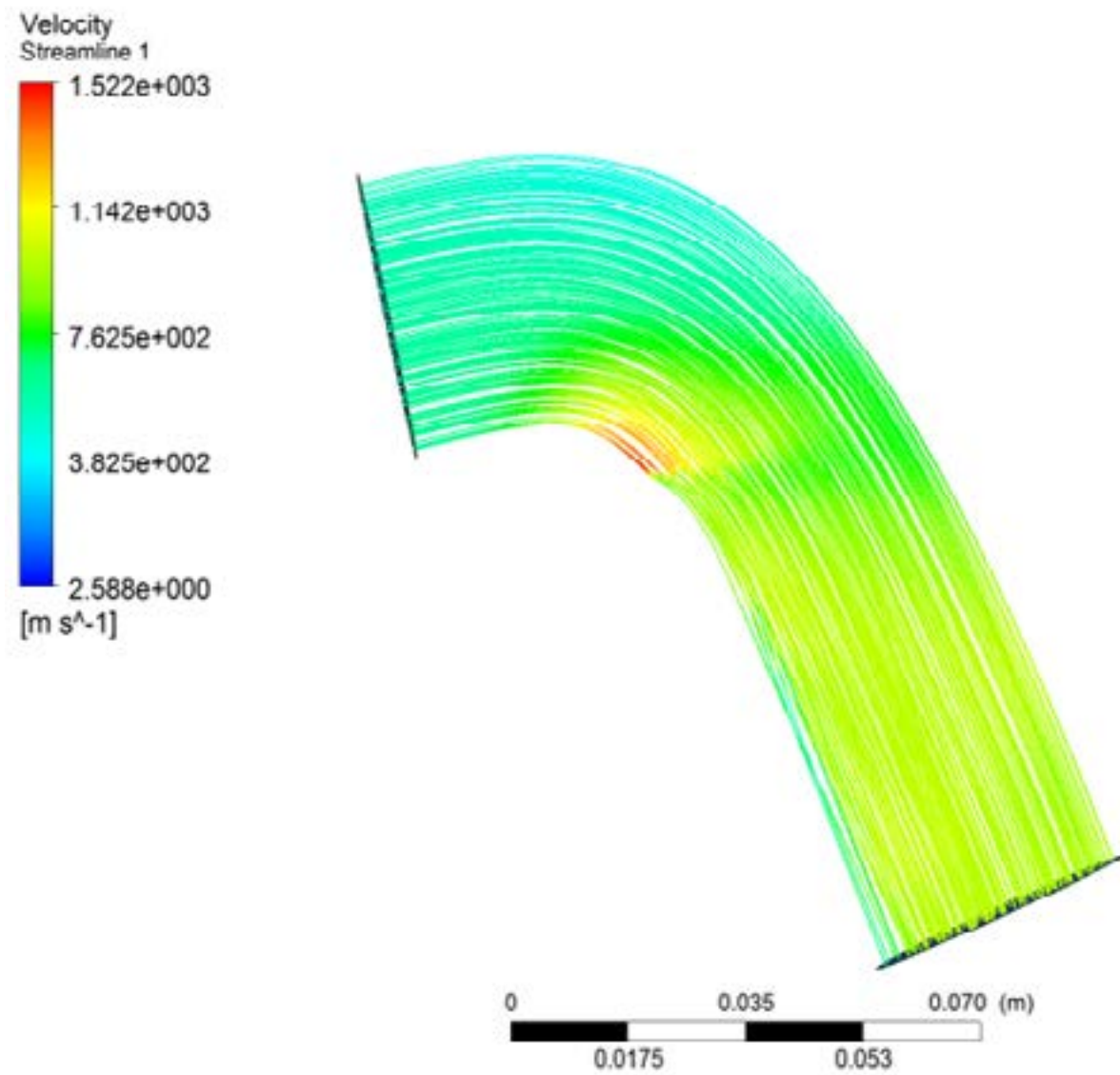


Densidad Max. 0.7975 Kg/m³ Min. 0.1957 Kg/m³

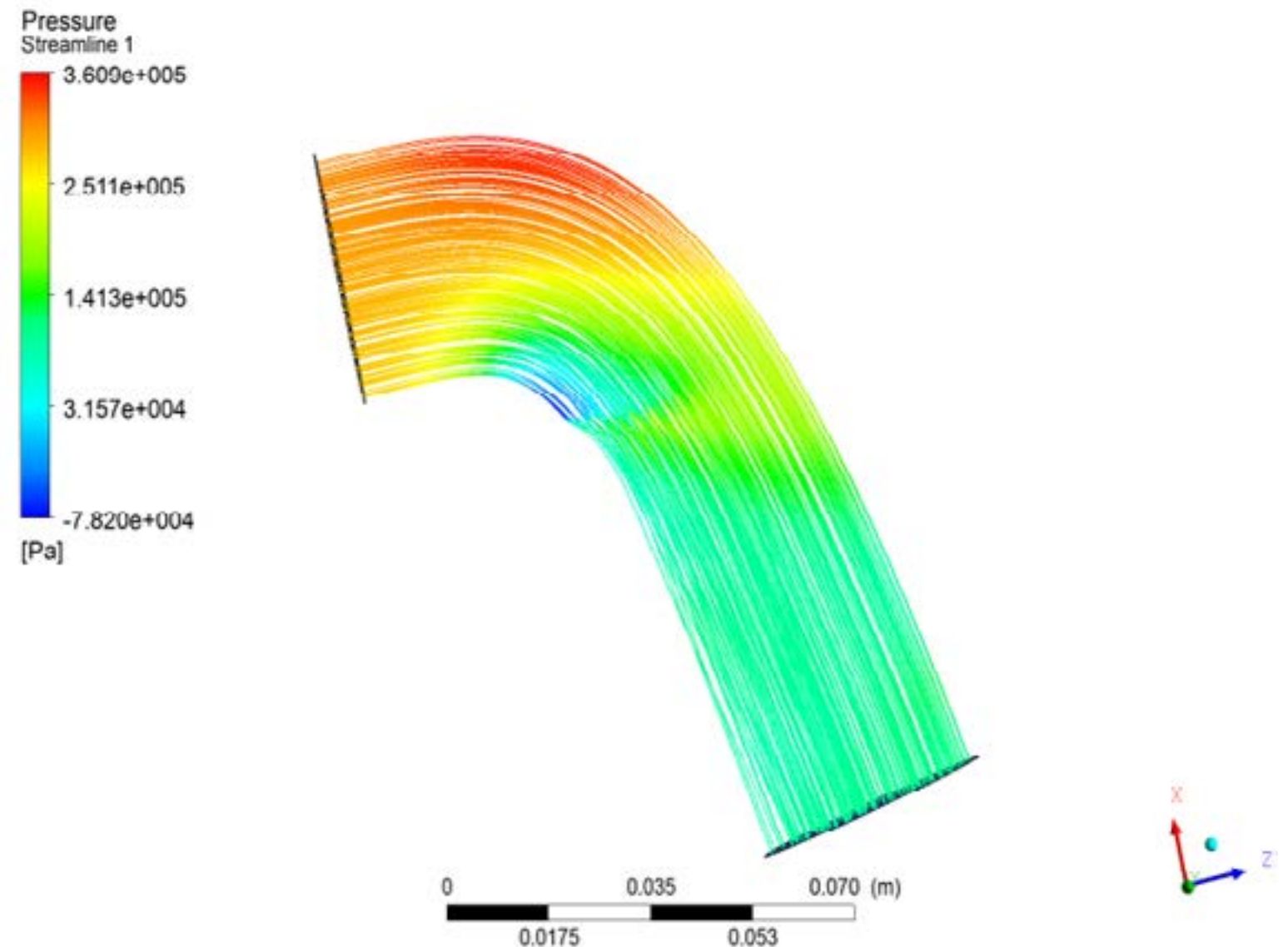


POST PROCESO

Resultados Colector N3



Velocidad Max. 1522 m/s Min. 2.588 m/s

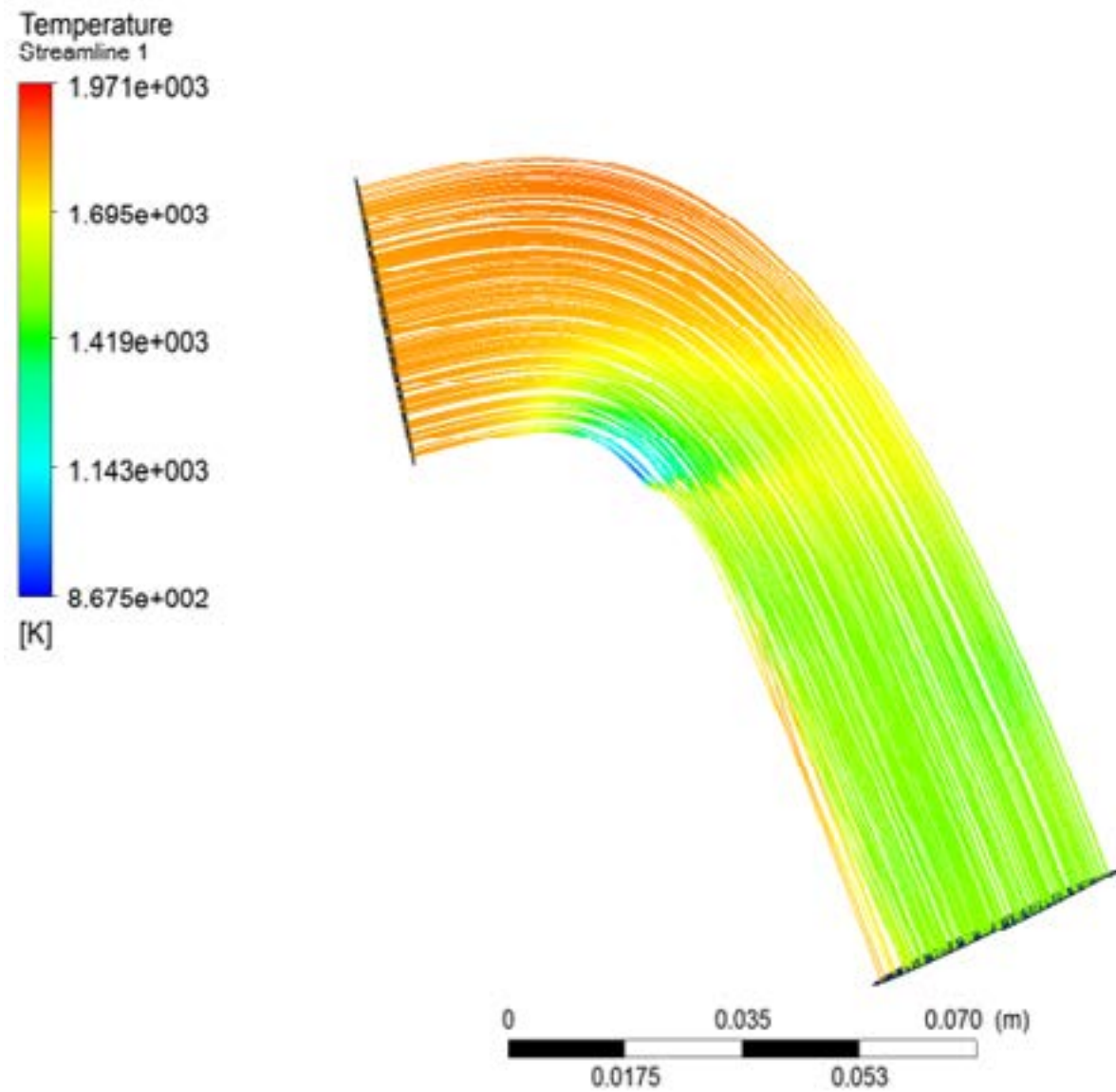


Presión Max. 3.609 bar Min. -0.782 bar

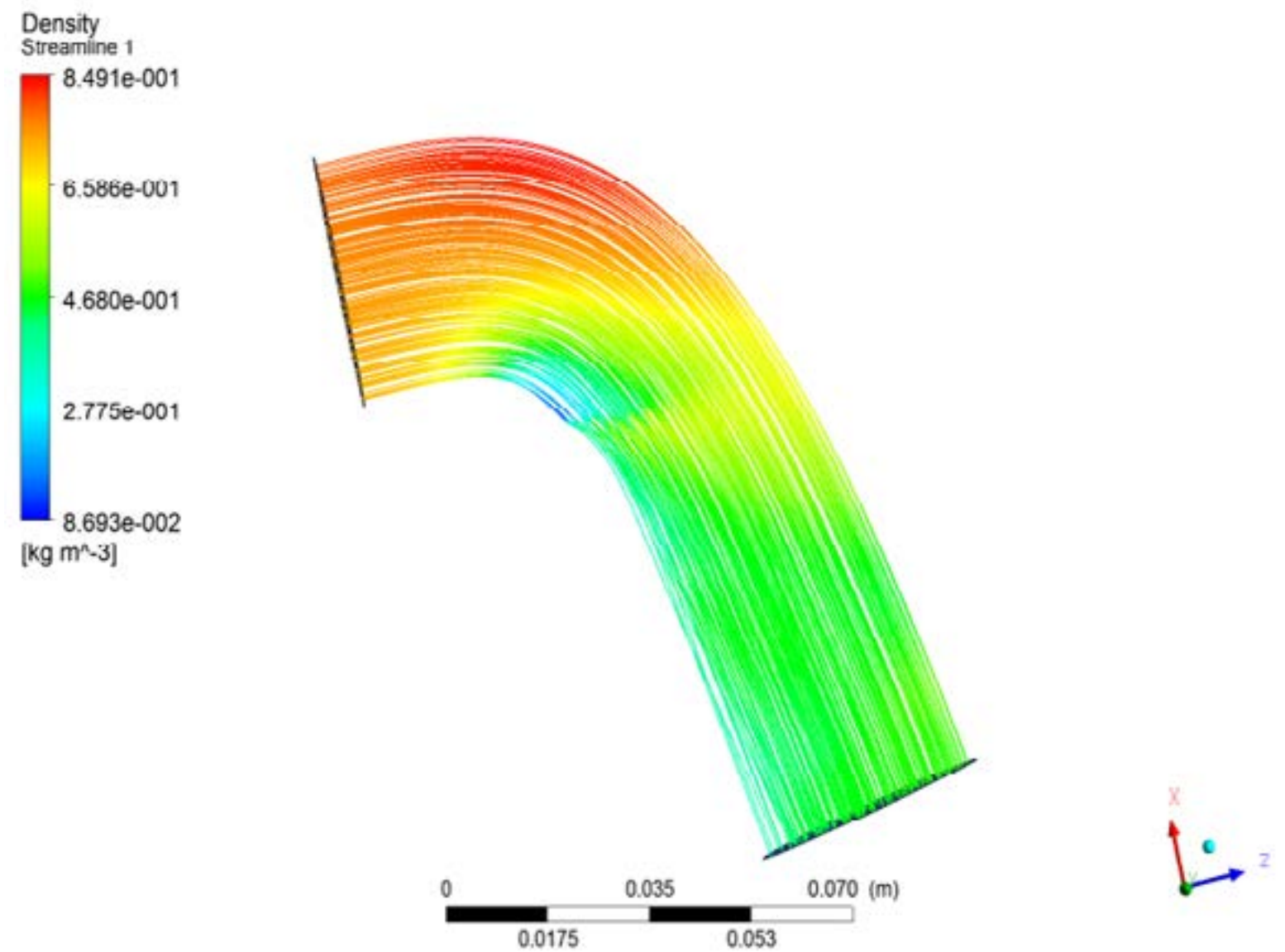


POST PROCESO

Resultados Colector N3



Temperatura Max. 1971°K (1697.9°C)
Min. 867.5K (594.4°C)

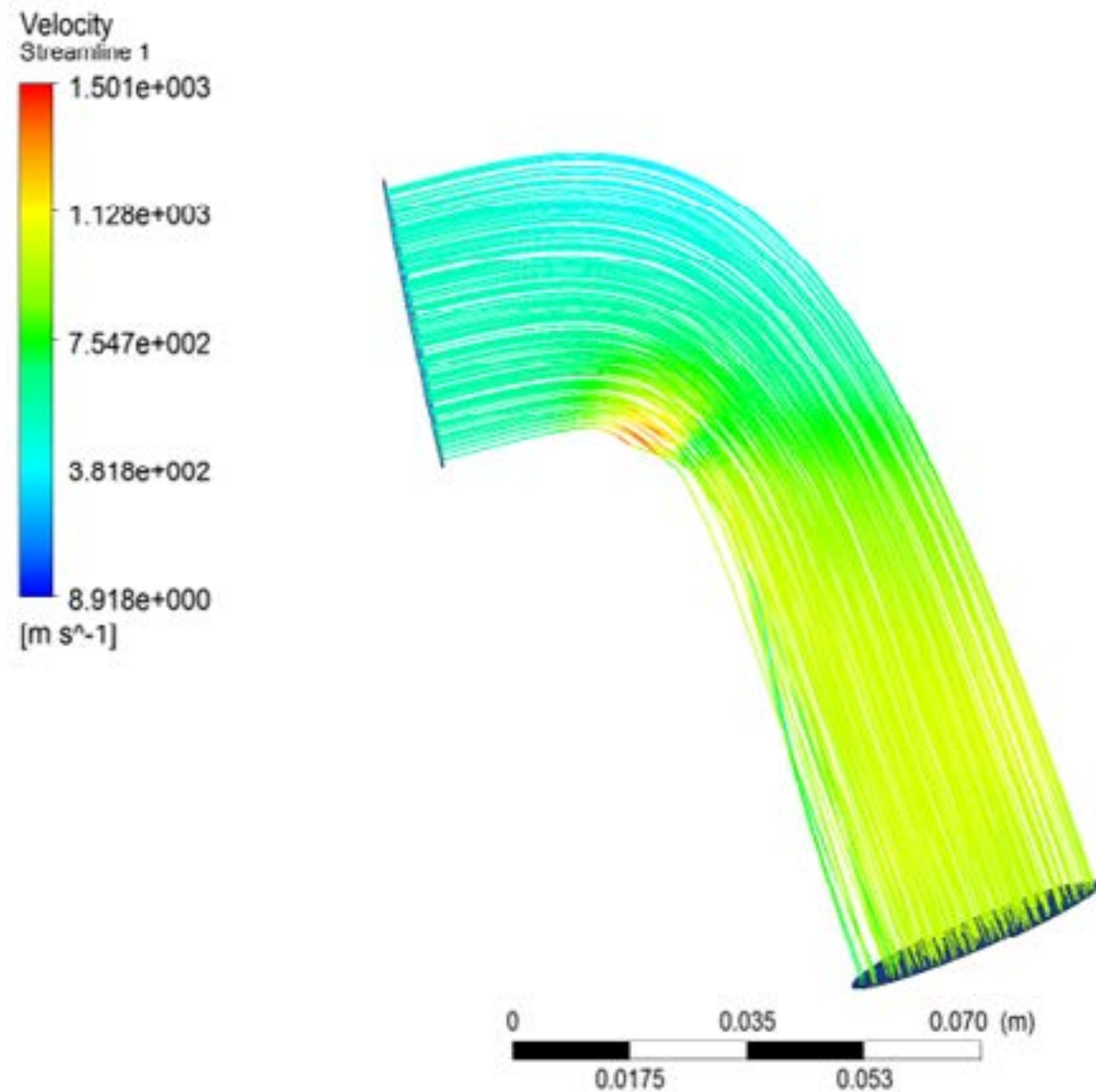


Densidad Max. 0.8491 Kg/m3 Min. 0.08693 Kg/m3

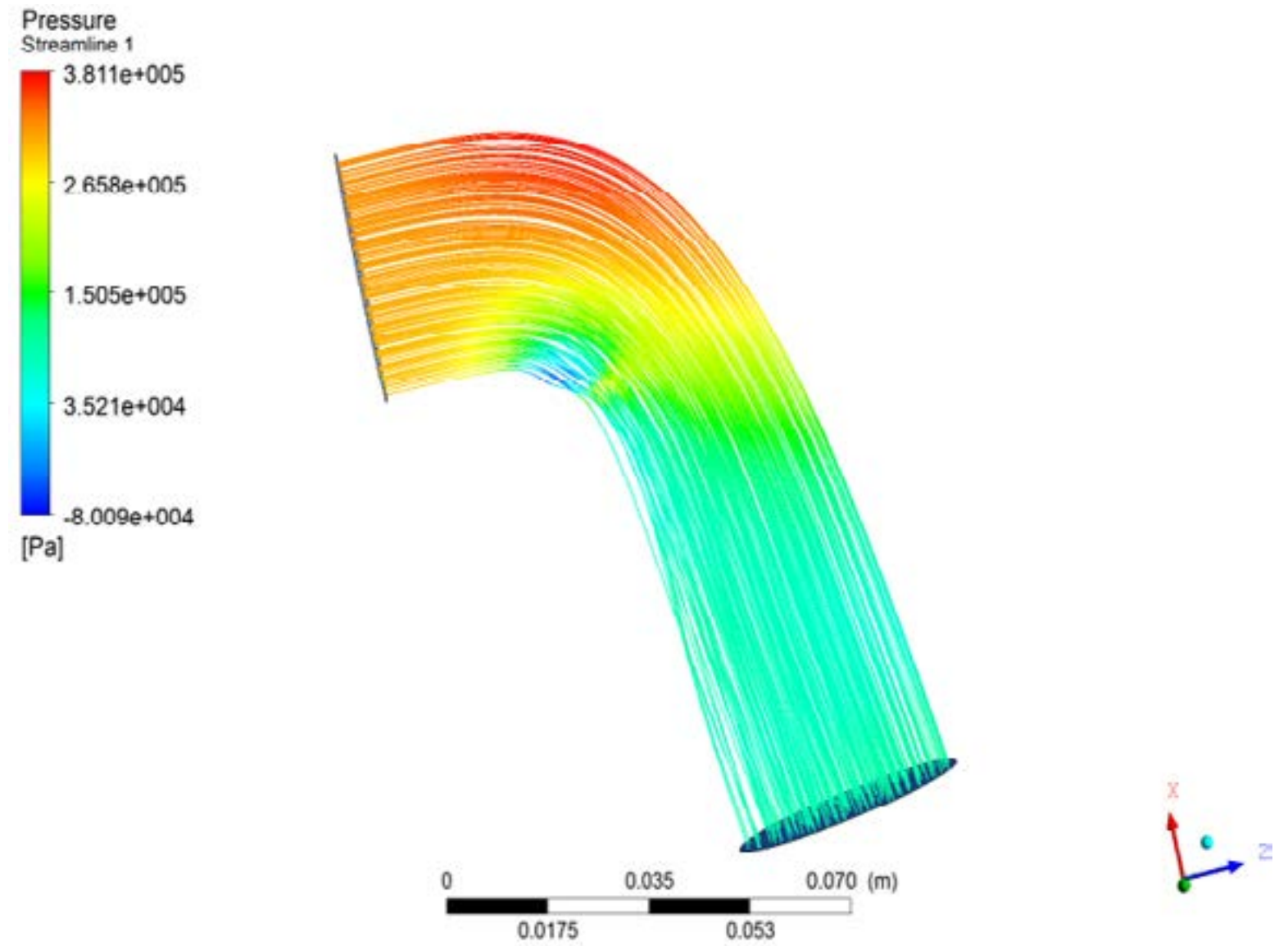


POST PROCESO

Resultados Colector N4



Velocidad Max. 1501 m/s Min. 8.918 m/s

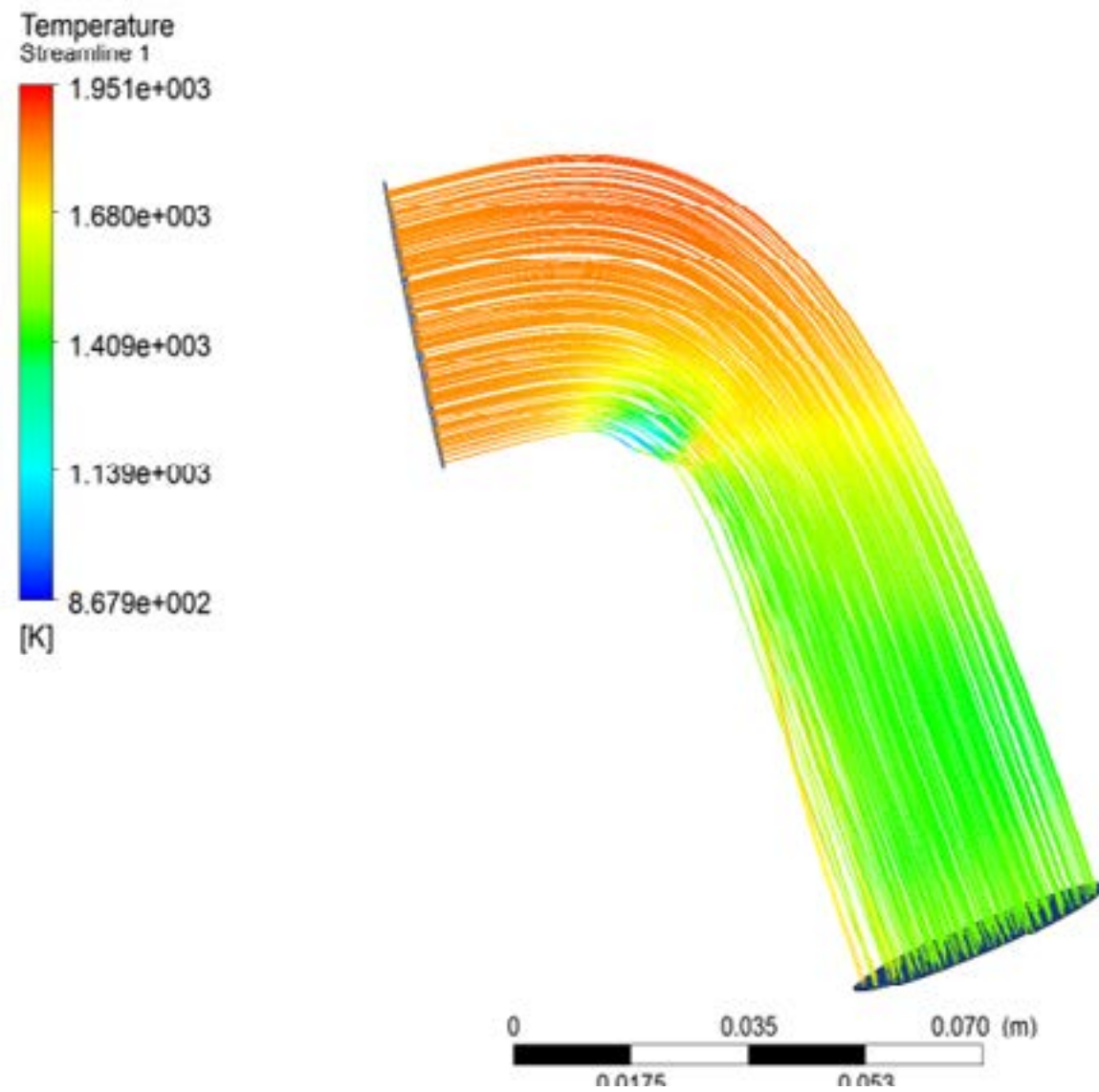


Presión Max. 3.811 bar Min. -0.8009 bar

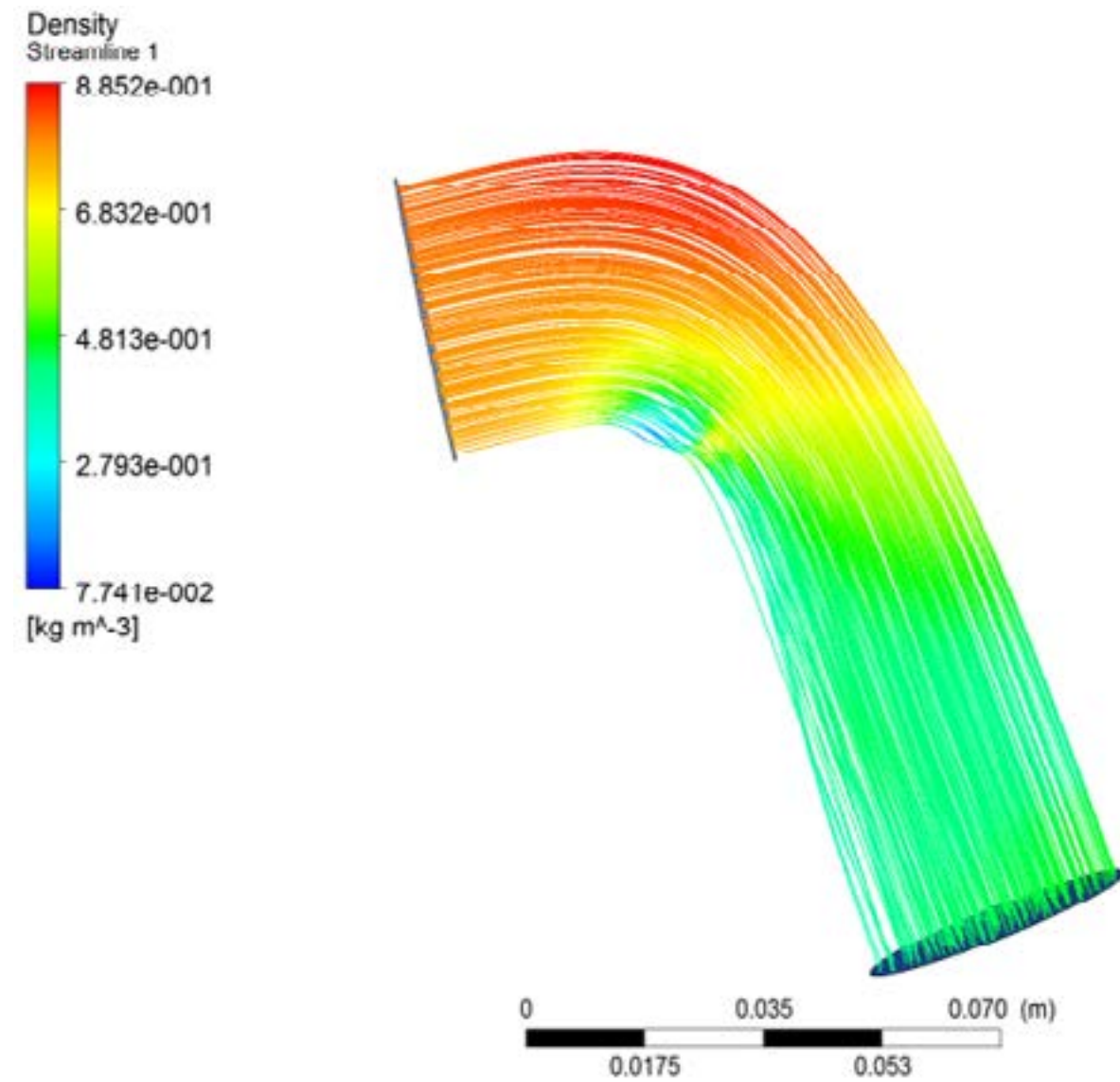


POST PROCESO

Resultados Colector N4



**Temperatura Max. 1951°K (1677.9°C)
Min. 867.9K (594.8)**

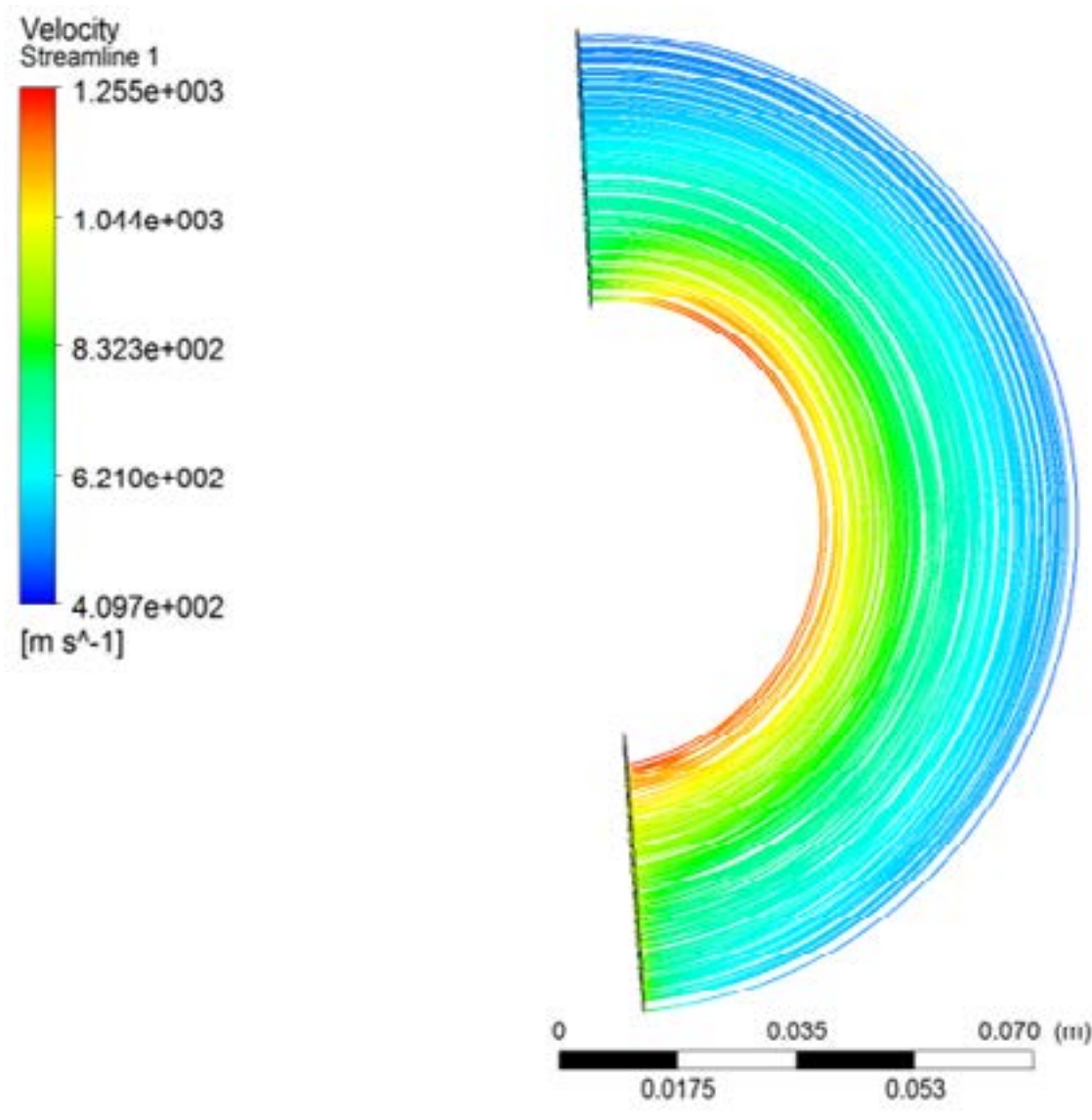


Densidad Max. 0.8852 Kg/m3 Min. 0.07741 Kg/m3

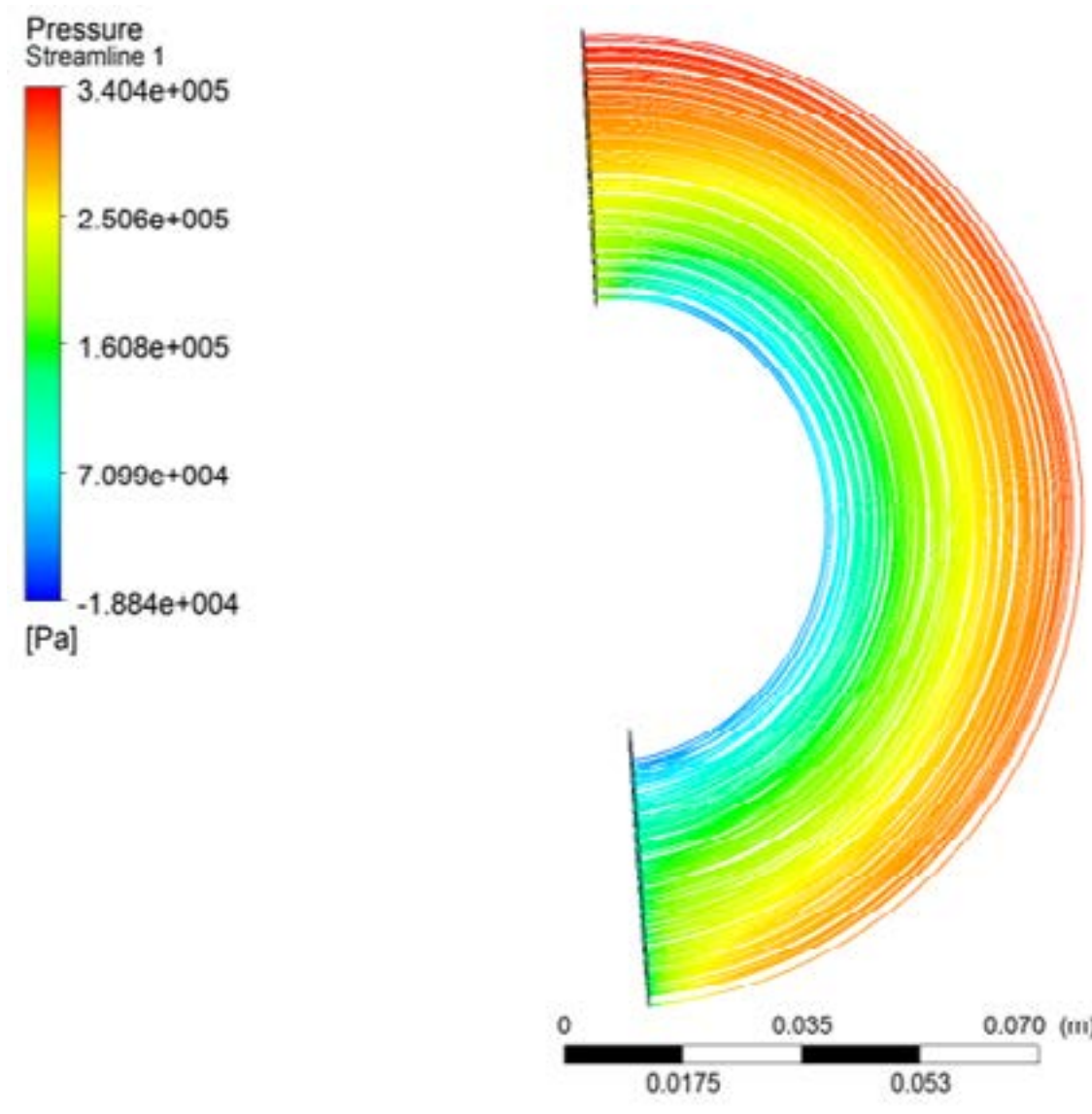


POST PROCESO

Resultados Colector N5



Velocidad Max. 1255 m/s Min. 409.7 m/s

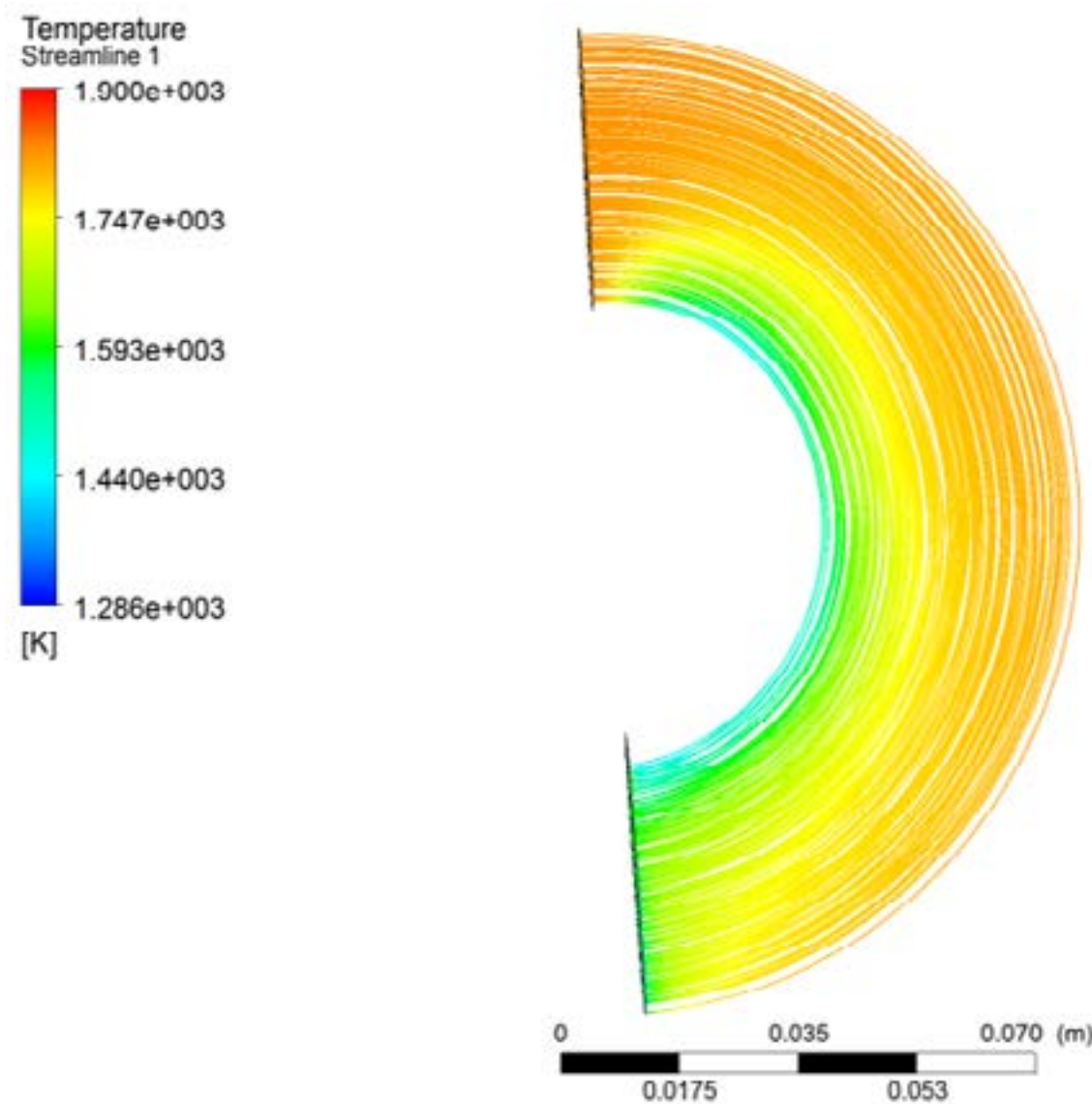


Presión Max. 3.404 bar Min. -0.1884 bar

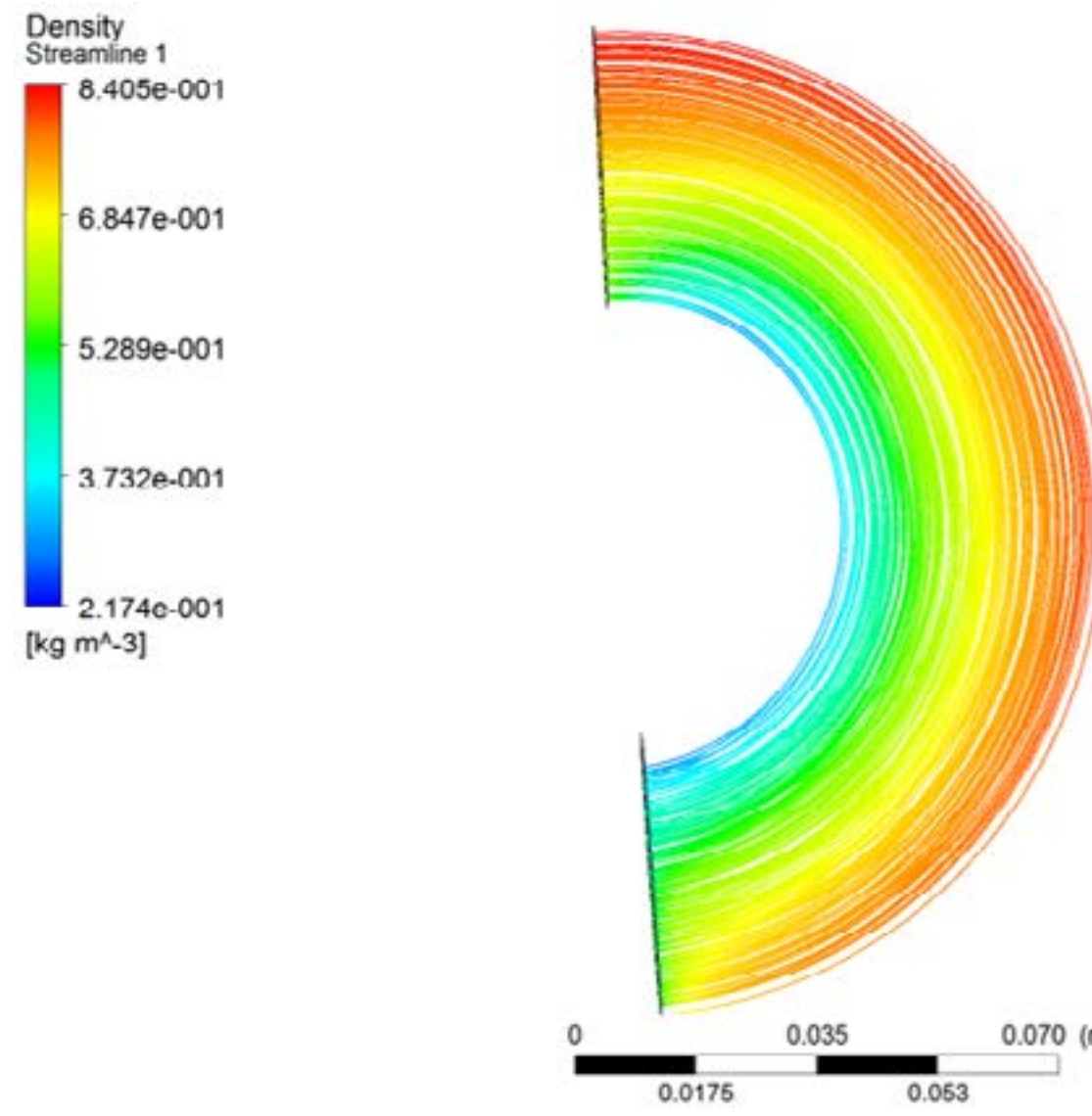


POST PROCESO

Resultados Colector N5



**Temperatura Max. 1900°K (1626.9°C)
Min. 1286°K (1012.9°C)**



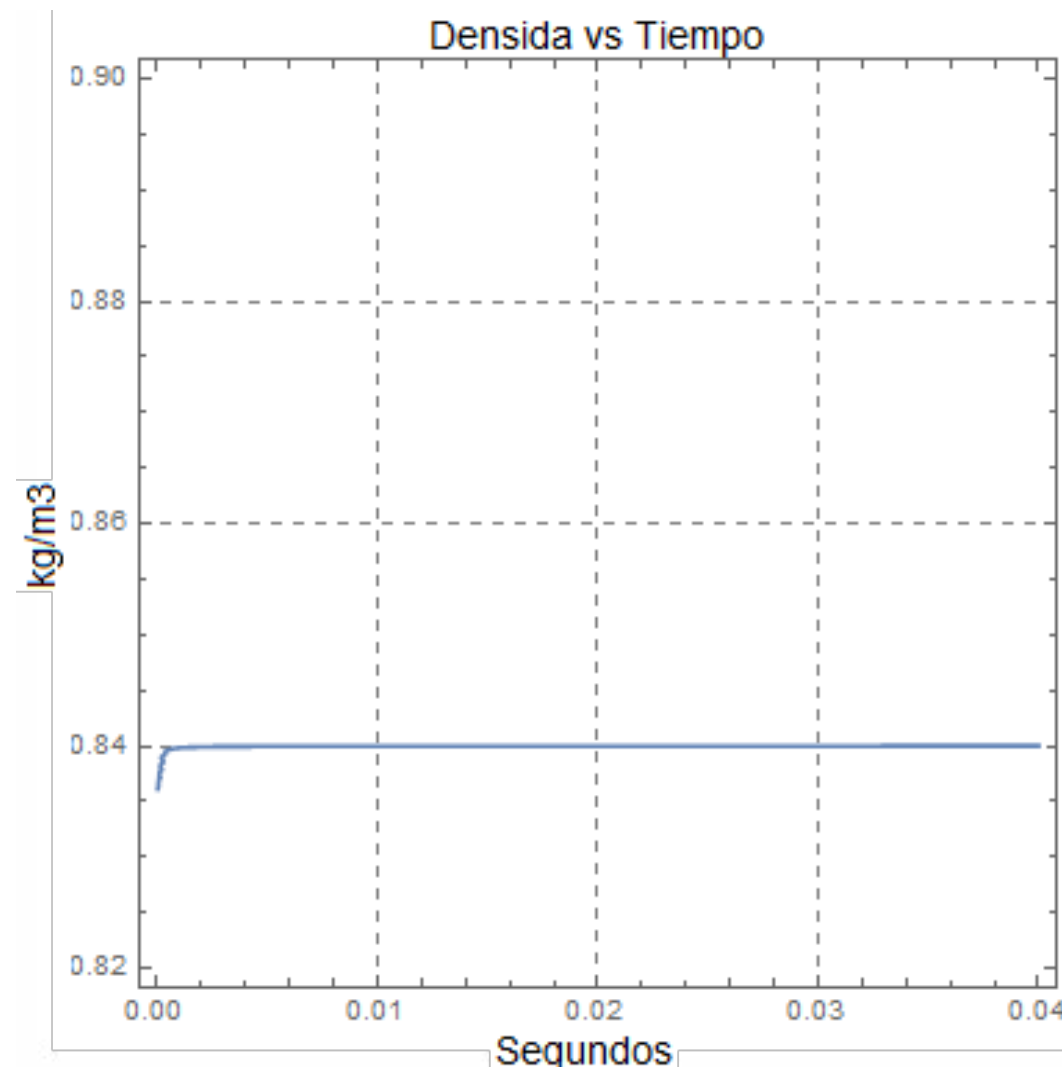
Densidad Max. 0.8405 Kg/m3 Min. 0.2174 Kg/m3



VERIFICACIÓN DE LA CONVERGENCIA DE RESULTADOS

Ecuación de Densidad

$$\rho_P = \frac{\left[\rho_{P0} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \rho_w \left(\frac{u_{W0} + u_{P0}}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta x}{\Delta t} + \left(\frac{u_{E0} + u_{P0}}{2} \right) \right]}$$





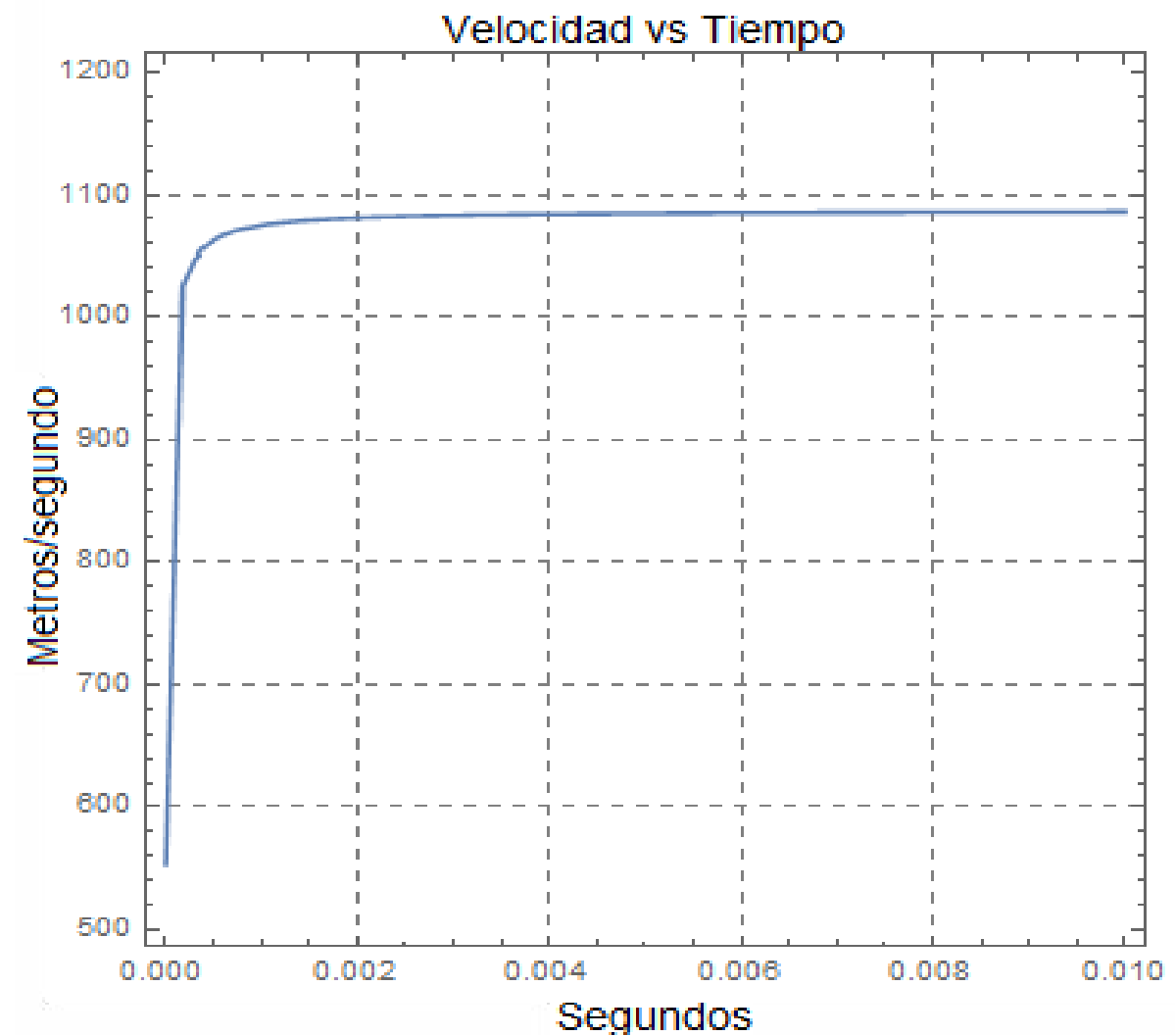
VERIFICACIÓN DE LA CONVERGENCIA DE RESULTADOS

Ecuación de Velocidad

$$vP = \frac{\left[\frac{pW^0 - pE^0}{2} + mW \left(\frac{uW^0 + uP^0}{2} \right) + mP^0 \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta x}{\Delta t} + \left(\frac{uE^0 + uP^0}{2} \right) \right]}$$

$$Deno = \left[\rho P^0 \frac{\Delta x}{\Delta t} + \rho w \left(\frac{uW^0 + uP^0}{2} \right) \right]$$

$$\left[\frac{\Delta x}{\Delta t} + \left(\frac{uE^0 + uP^0}{2} \right) \right]$$

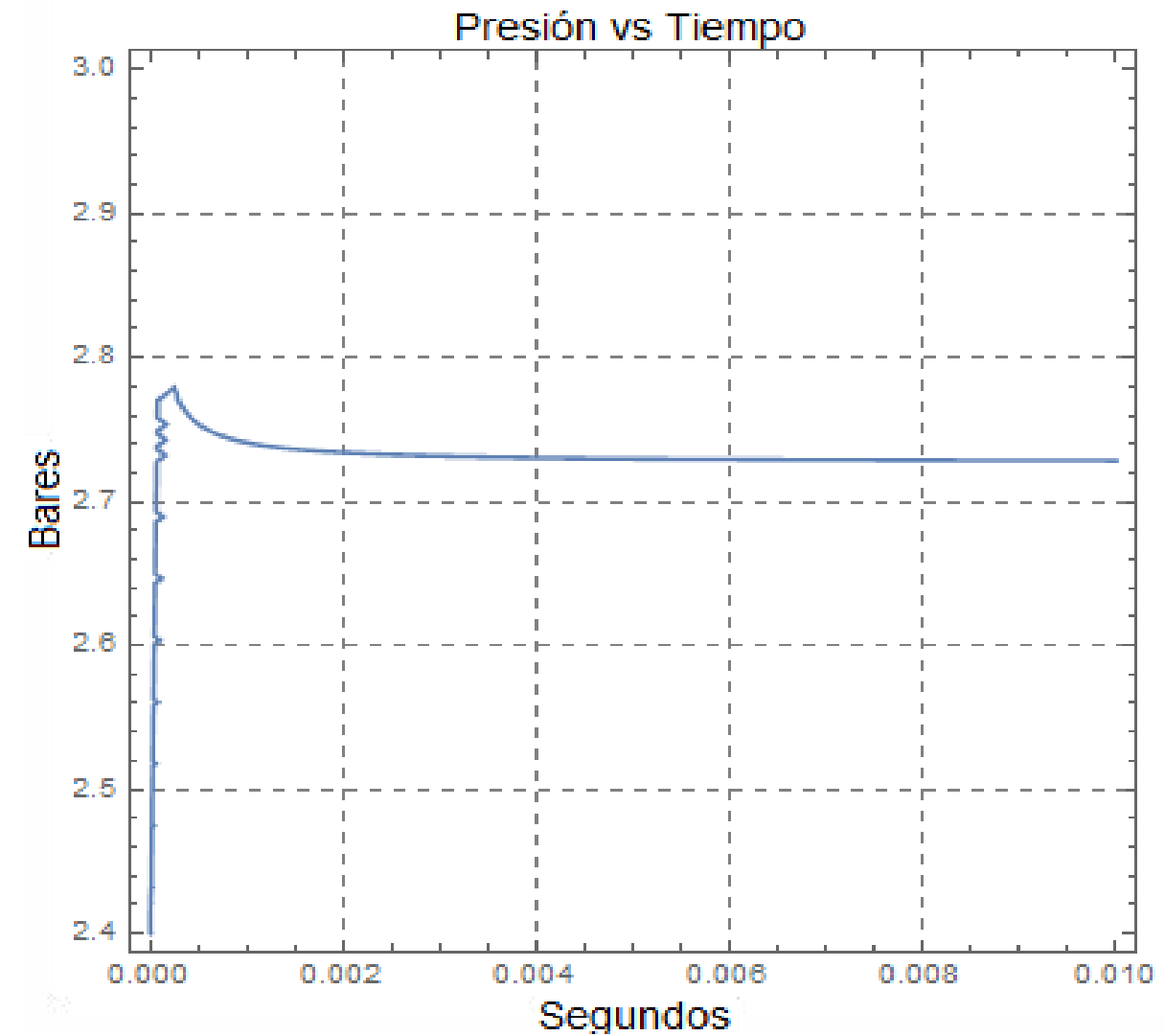




VERIFICACIÓN DE LA CONVERGENCIA DE RESULTADOS

Ecuación de Presión

$$pP = \frac{1}{100000} * \frac{\gamma - 1}{\gamma} \left| (\rho h^0) P - \frac{m^2 P}{2\rho P} \right|$$





CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLE DE ESCAPE DE ALTO RENDIMIENTO

- Se selecciona los colectores: colector N1, colector N4 y colector N5.
- Con cada geometría de colector se construye un múltiple de escape.
- Es necesario utilizar planos impresos a escala real que faciliten comprobar las geometrías propuestas.

Nº De proceso	Proceso
1	Medición
2	Trazado
3	Corte
4	Doblado
5	Unión de partes
6	Soldadura
7	Acabados
8	Montaje



CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLE DE ESCAPE DE ALTO RENDIMIENTO

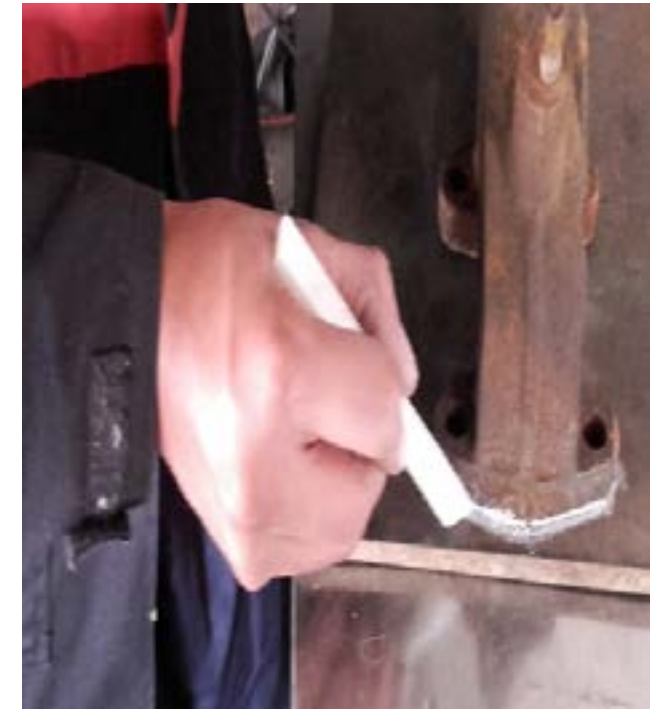
Medición

Posterior a las geometrías propuestas se obtuvieron medidas para el modelamiento y construcción de acuerdo al espacio físico del motor y del escape original.



Trazado

Se realizó diferentes trazos en el tubo en función de las curvaturas obtenidas, y en la plancha de acero según las bridas de unión originales y el empaque.





CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLE DE ESCAPE DE ALTO RENDIMIENTO

Corte

Se corto según los diferentes trazos realizados en el tubo, así como también en las bridas de unión.



Doblado

Se realizo dobleces solo en secciones que las curvaturas no sean tan complejas para la máquina y la matriz.





CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLE DE ESCAPE DE ALTO RENDIMIENTO

Unión de partes

Se verifico que cada colector no se aproxime demasiado a sistemas que puedan ser afectados por el calor emitido.



Soldadura

Establecidas las uniones de los colectores se soldo cada parte que forma el múltiple de escape. Se debe evitar que la suelda penetre demasiado y ocasione perturbaciones en el flujo de gases





CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLE DE ESCAPE DE ALTO RENDIMIENTO

Acabados

Se elimina residuos de soldadura que se presentan en cada colector y se pule obteniendo un mejor acabado superficial del sistema en conjunto.





CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLE DE ESCAPE DE ALTO RENDIMIENTO

En las figuras se observan los distintos multiples construido y listos para su montaje en el motor

Múltiple Colector N1



Múltiple Colector N4



Múltiple Colector N5





CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLE DE ESCAPE DE ALTO RENDIMIENTO

Materiales empleados en la construcción de los colectores de escape de alto rendimiento

- Tubo de acero inoxidable AISI 409
- Es empleado en la industria automotriz para la fabricación de sistemas de escape.
- Alta resistencia a elevadas temperaturas, alta soldabilidad y facilidad de limpieza.

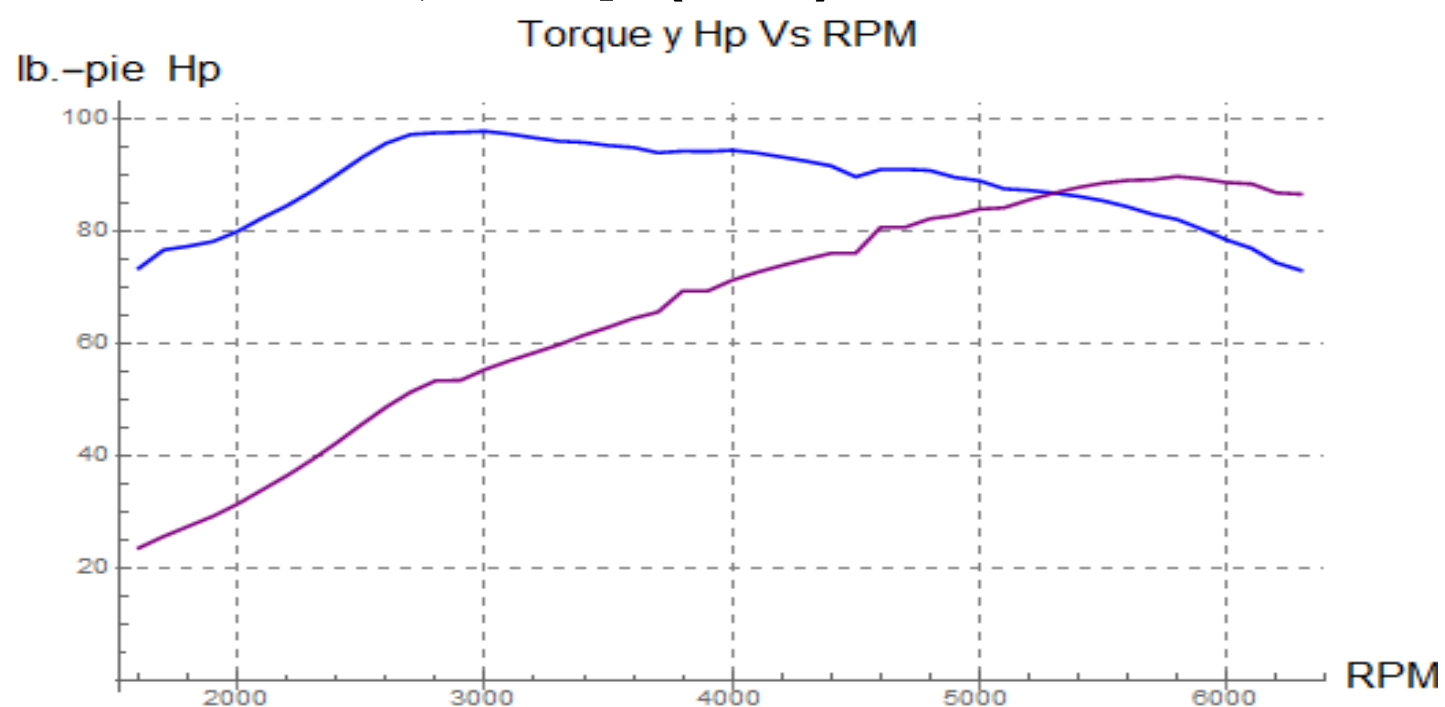
Material	Descripción	Peso
Tubo redondo acero Inox-409	40x1.5mm (1"1/2x1.5)	8.28kg/6m
Tubo redondo acero Inox-409	50x1.5mm (2"x1.5)	11.16kg/6m
Plancha acero	10mm	203.2kg
Plancha acero	0.7mm	16.4kg



ENSAYOS DE TORQUE Y POTENCIA

**Vehículo Volkswagen Saveiro gasolina
motor 1.8 litros**

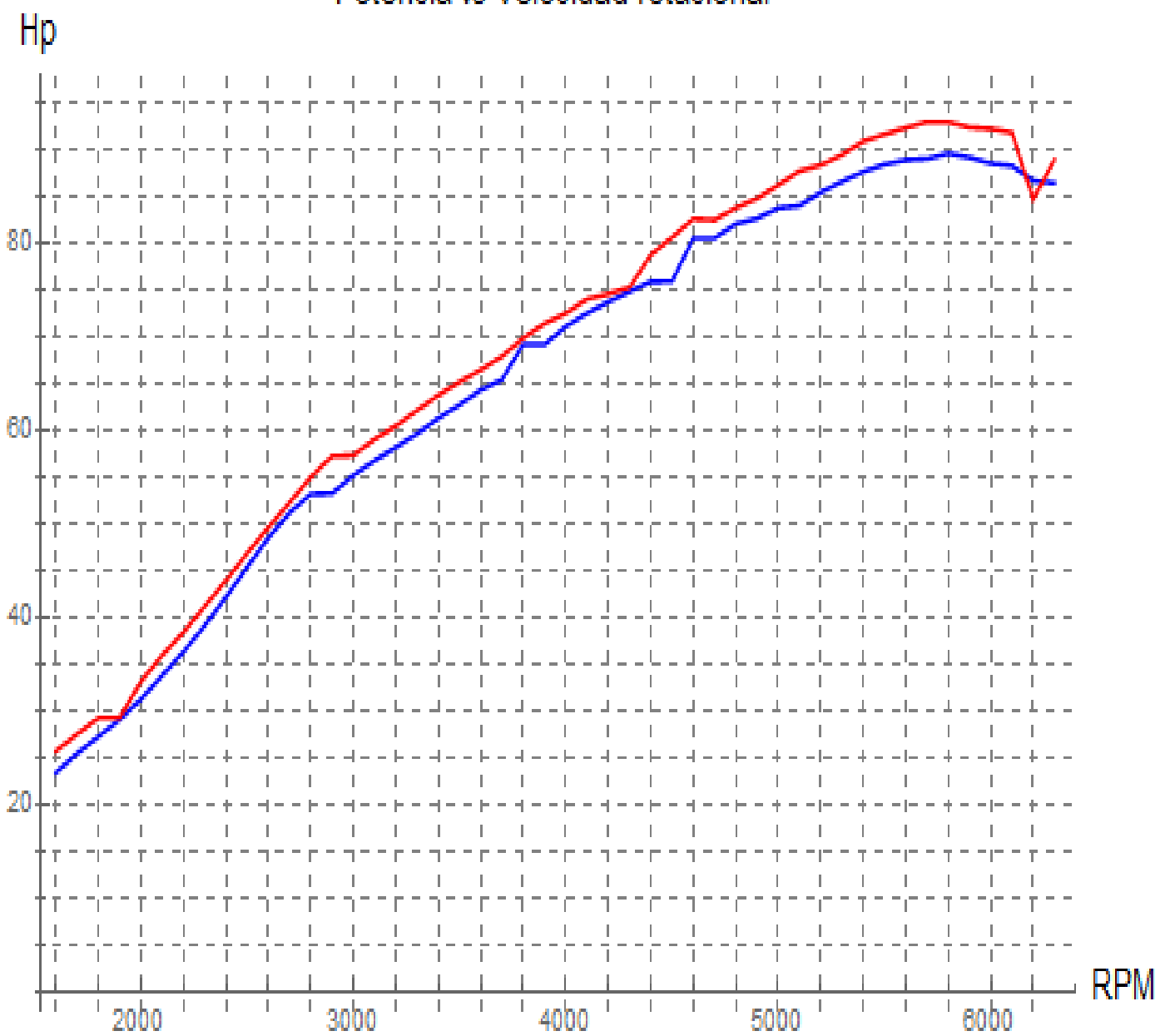
**Datos medidos con el múltiple de escape original
Torque 82,09 Libras-pie (DIN)
Potencia 89,74 Hp (DIN)**



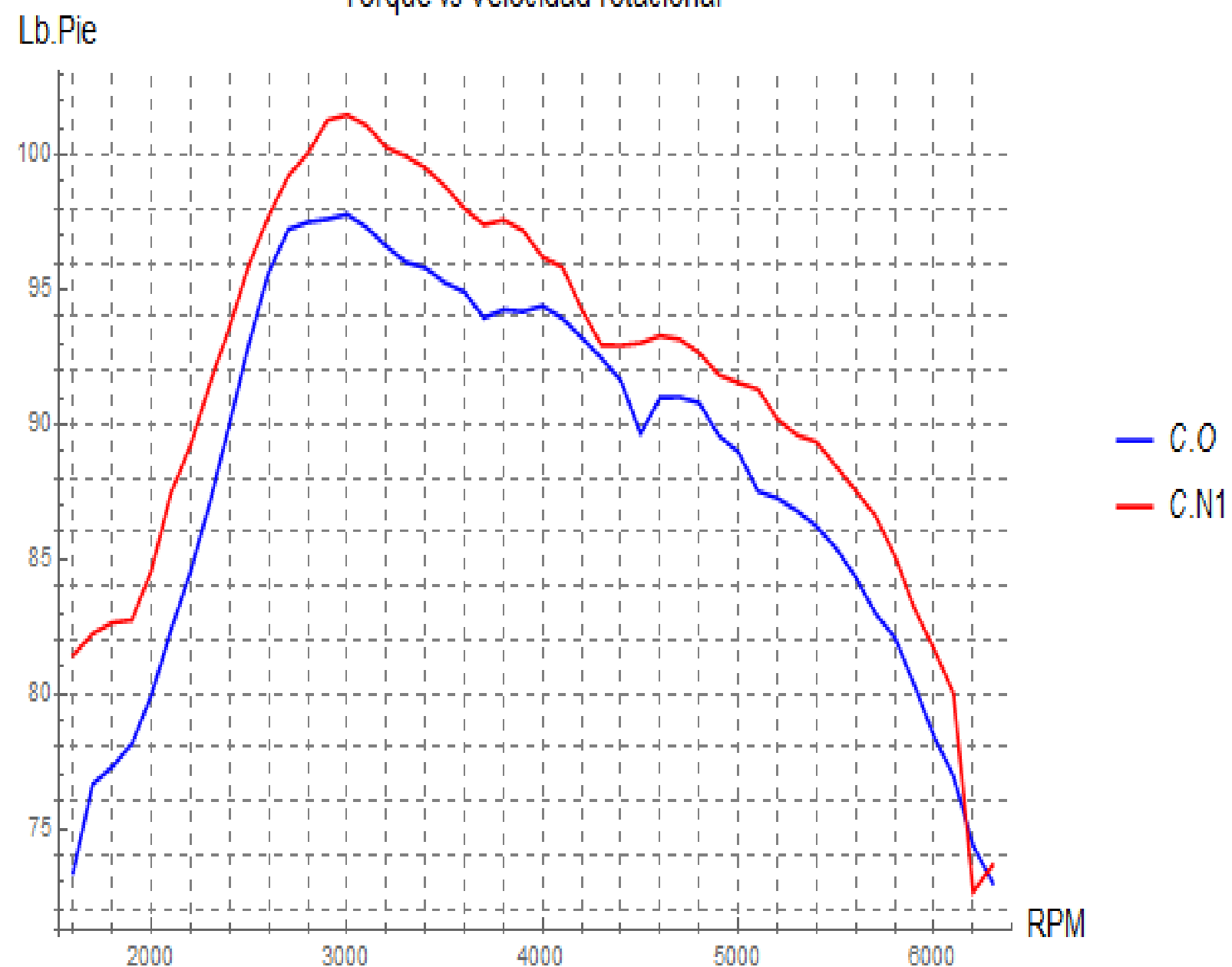


ENSAYOS DE TORQUE Y POTENCIA Colector N1

Potencia vs Velocidad rotacional



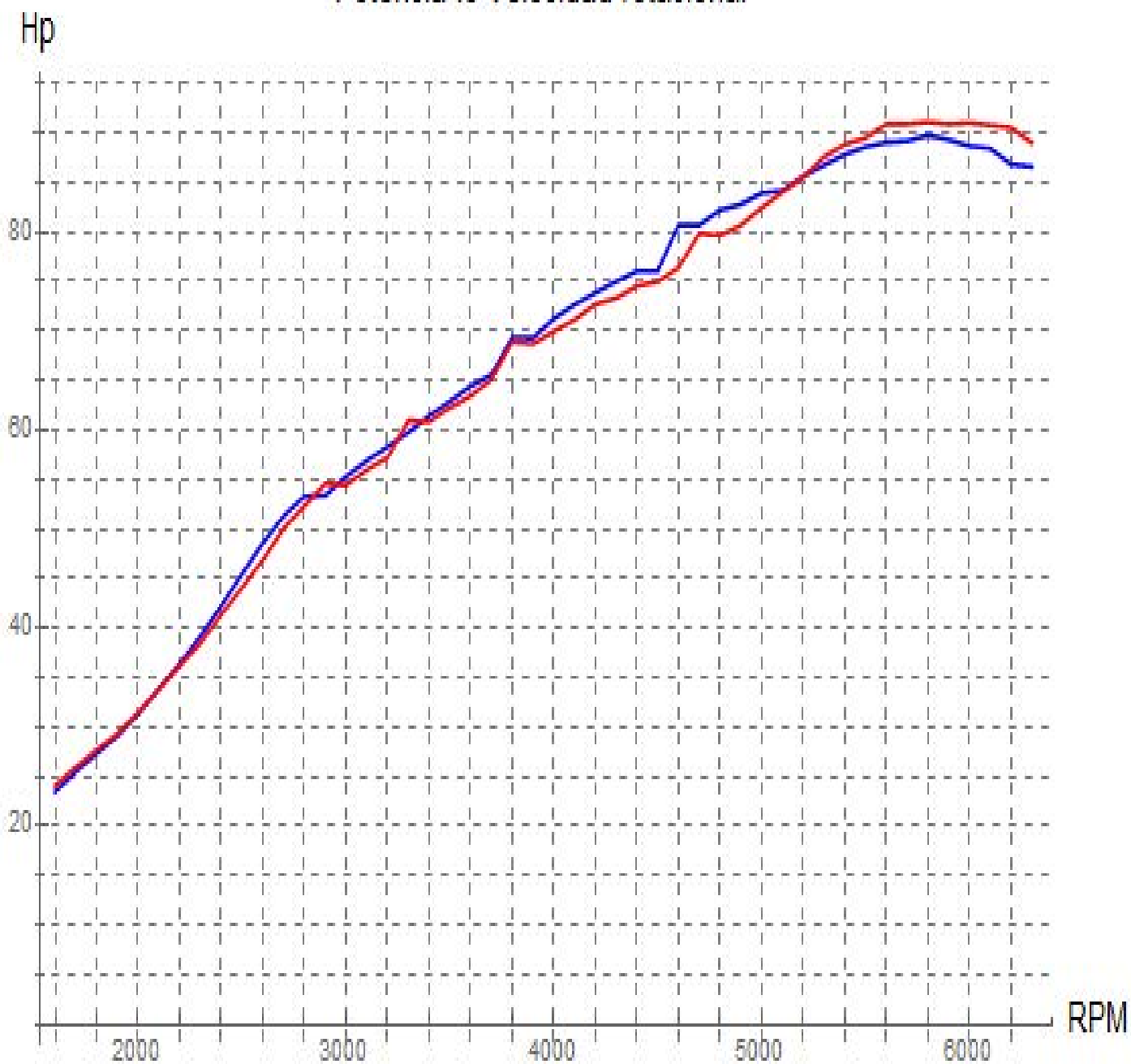
Torque vs Velocidad rotacional



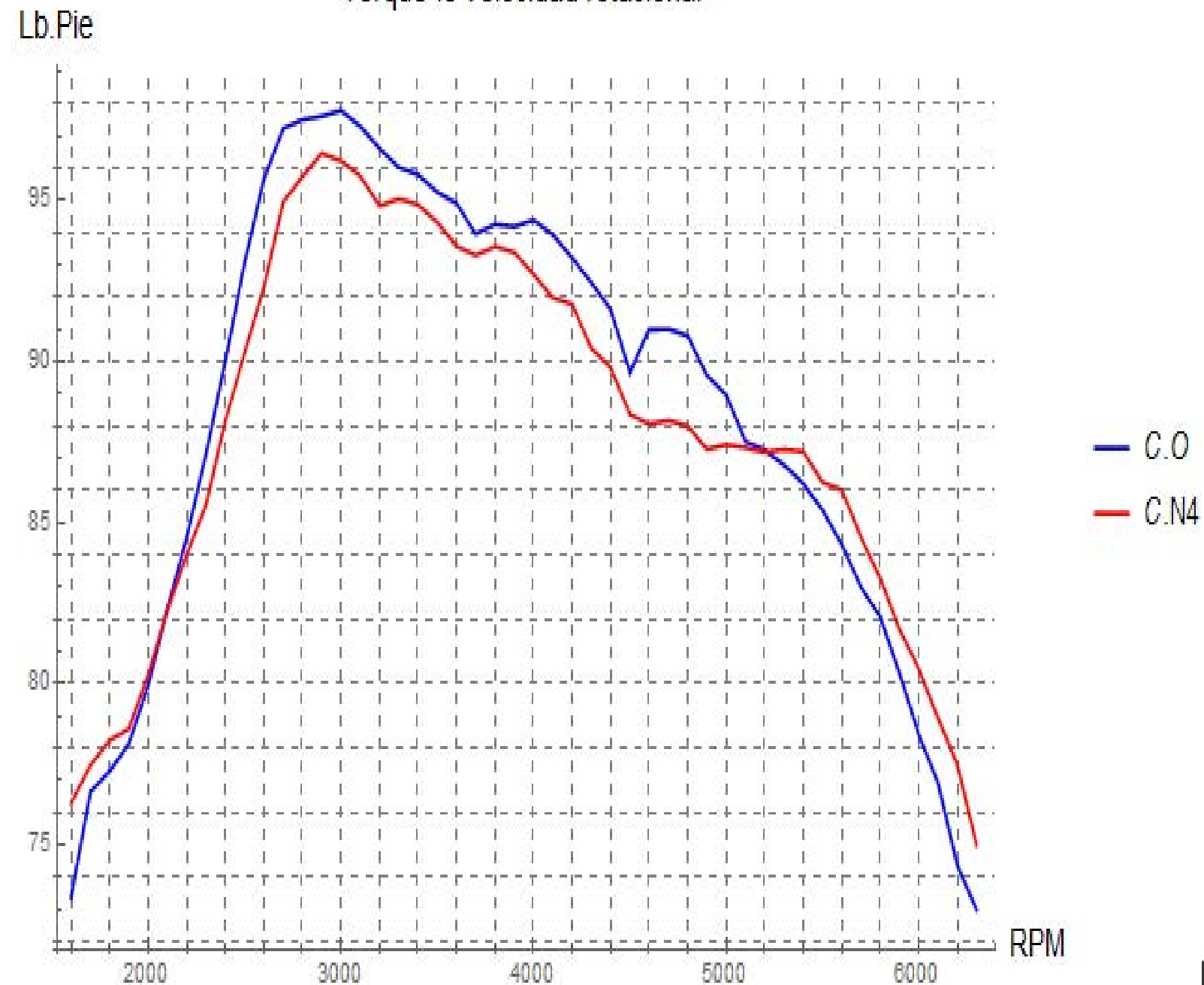


ENSAYOS DE TORQUE Y POTENCIA Colector N4

Potencia vs Velocidad rotacional



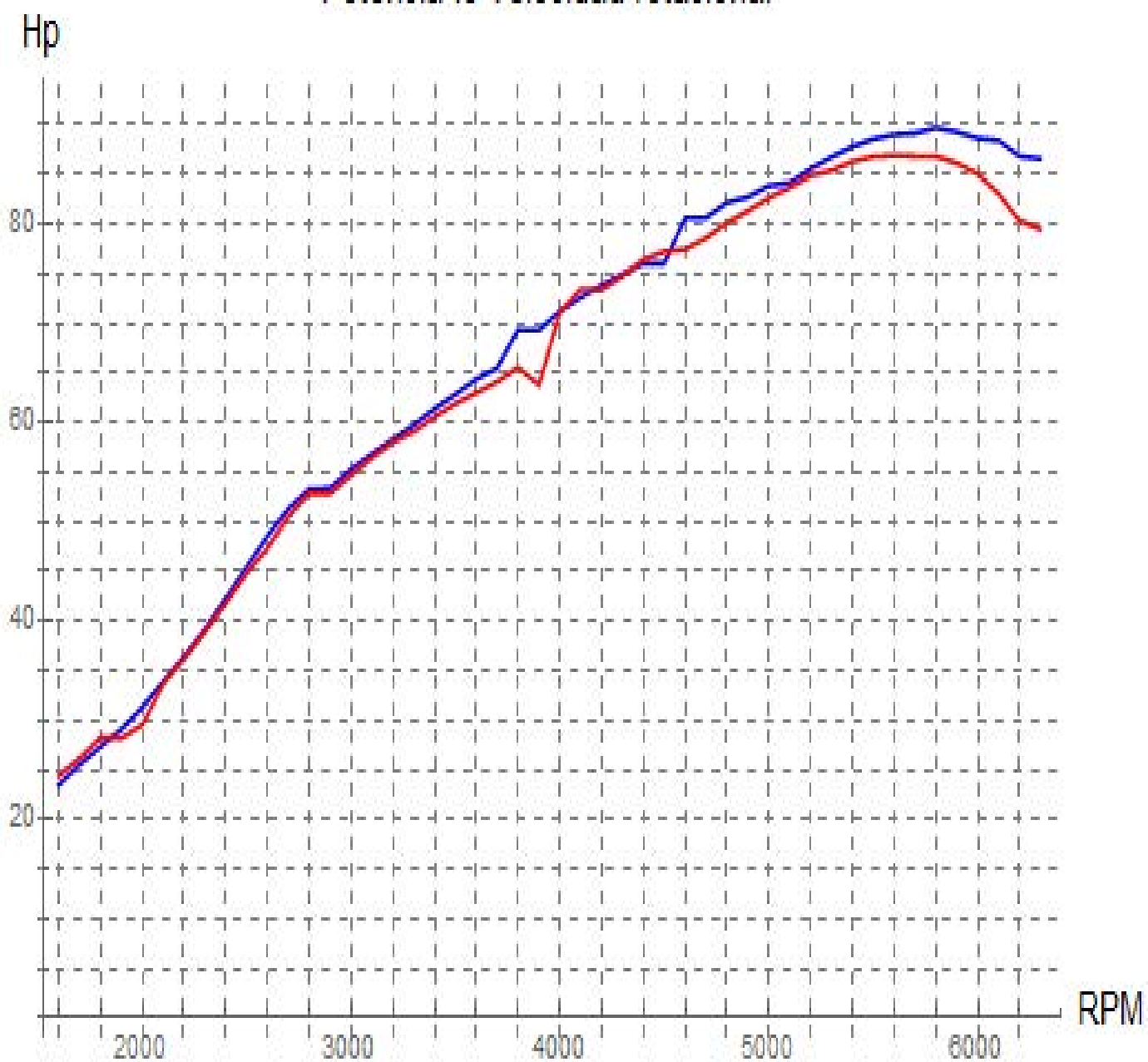
Torque vs Velocidad rotacional



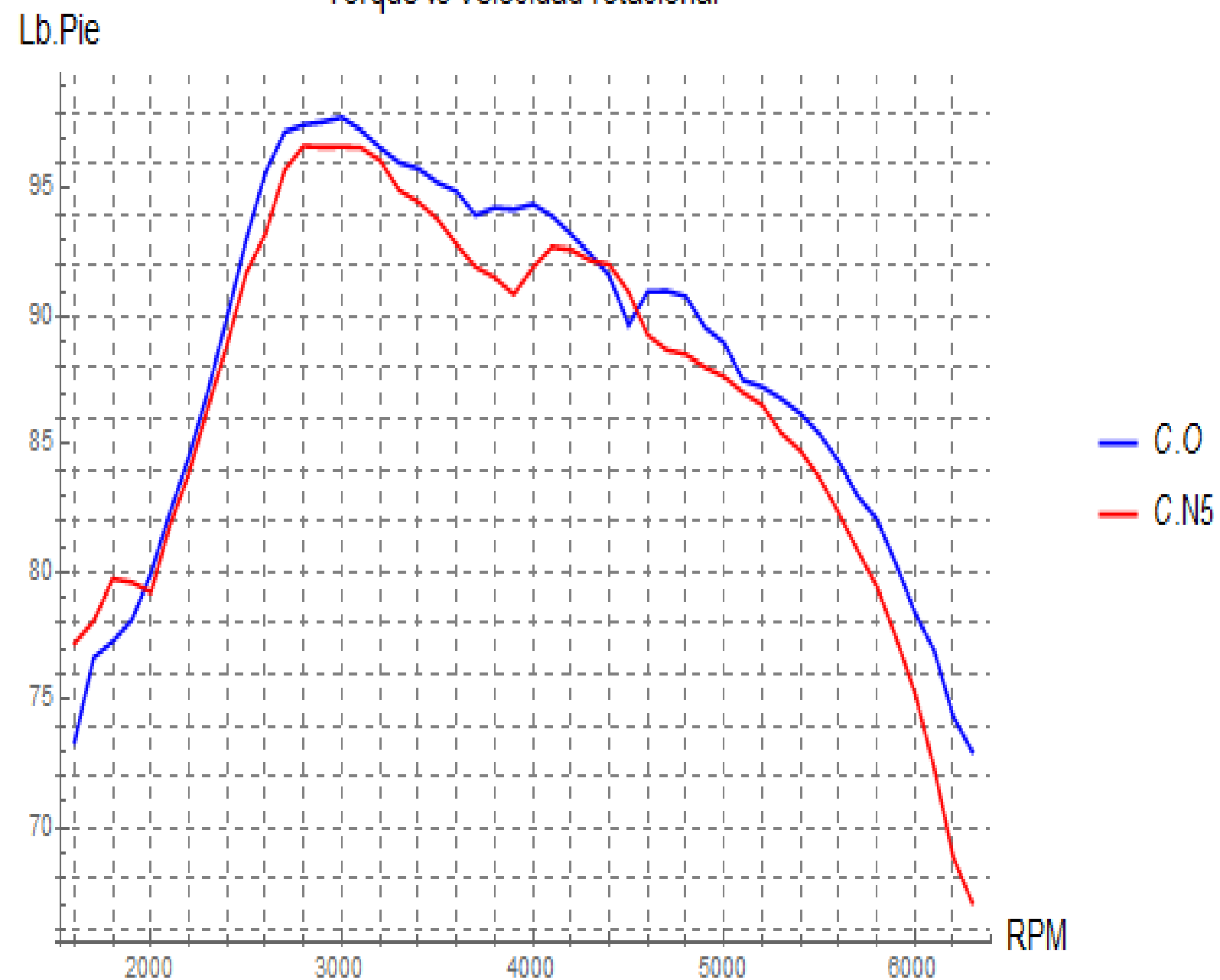


ENSAYOS DE TORQUE Y POTENCIA Colector N5

Potencia vs Velocidad rotacional



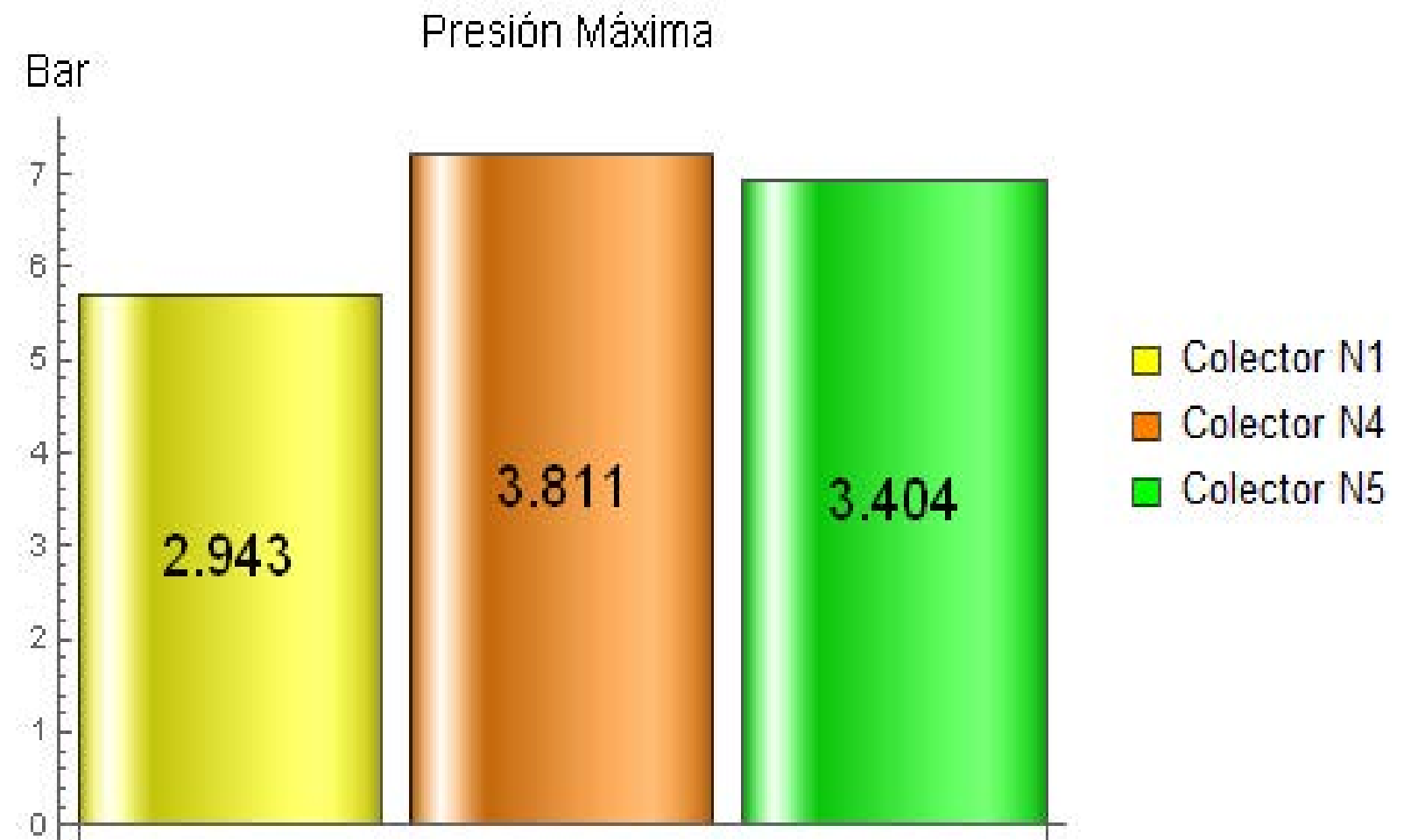
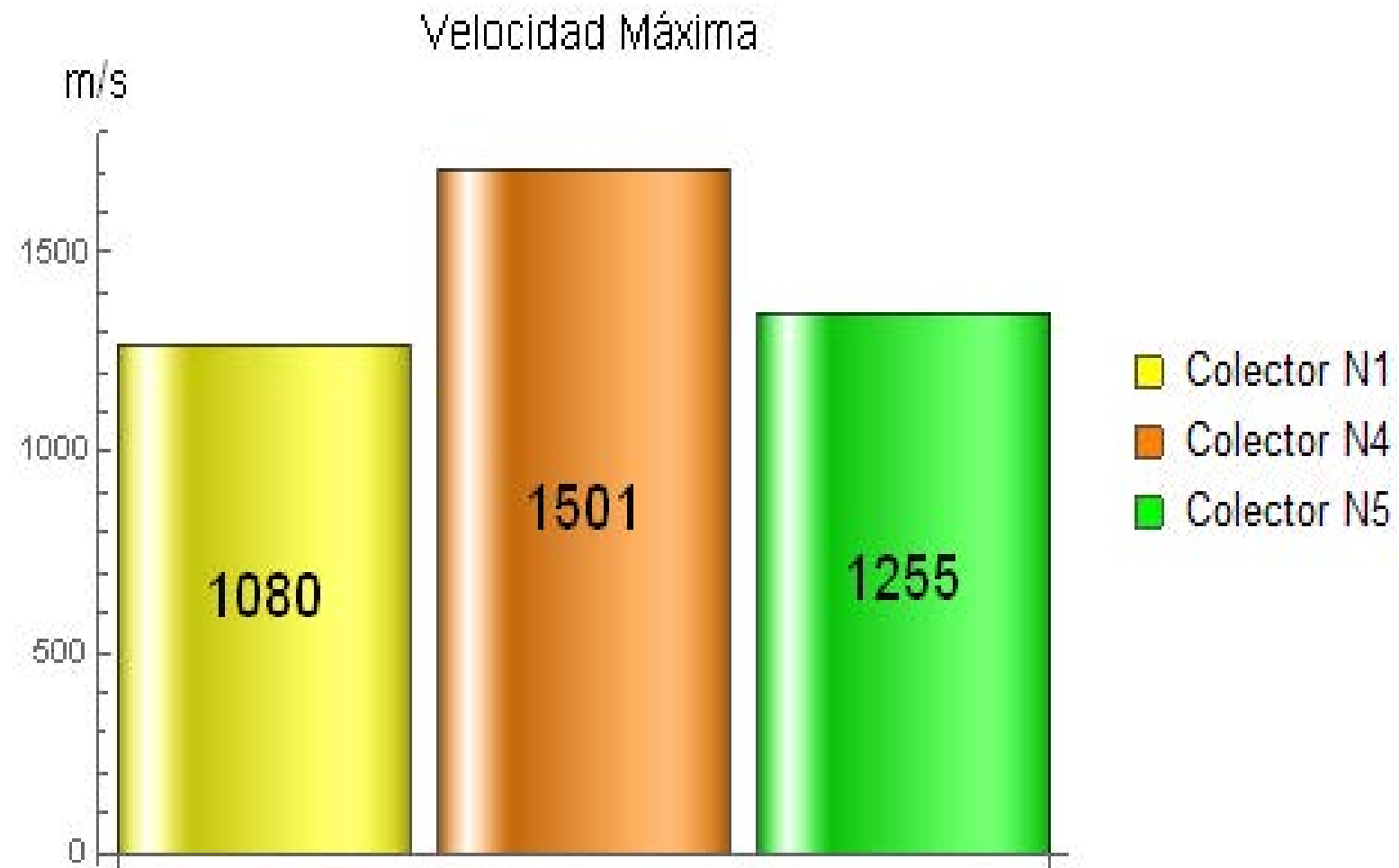
Torque vs Velocidad rotacional





ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados obtenidos de la simulación del fluido en los tres colectores construidos

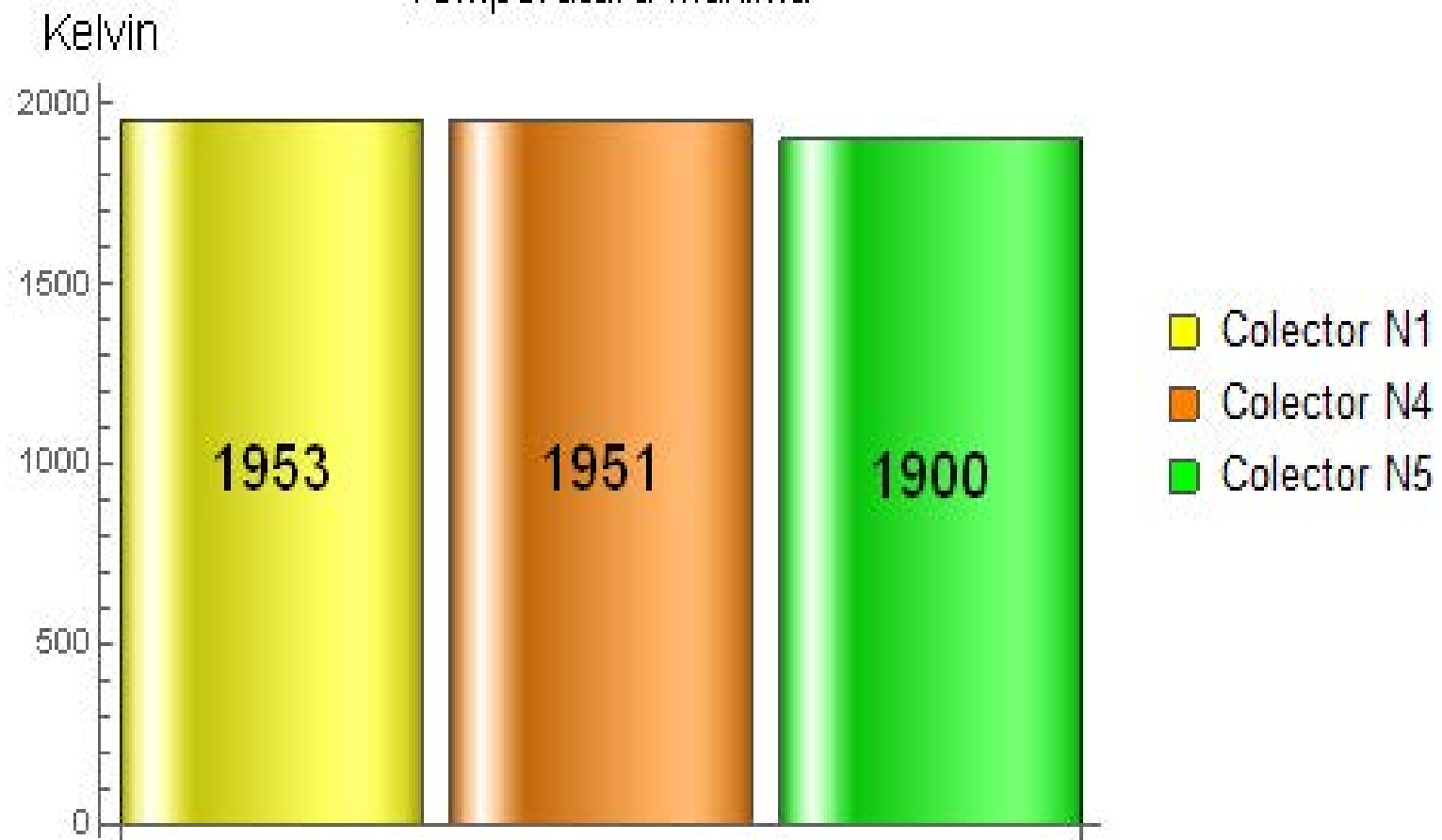




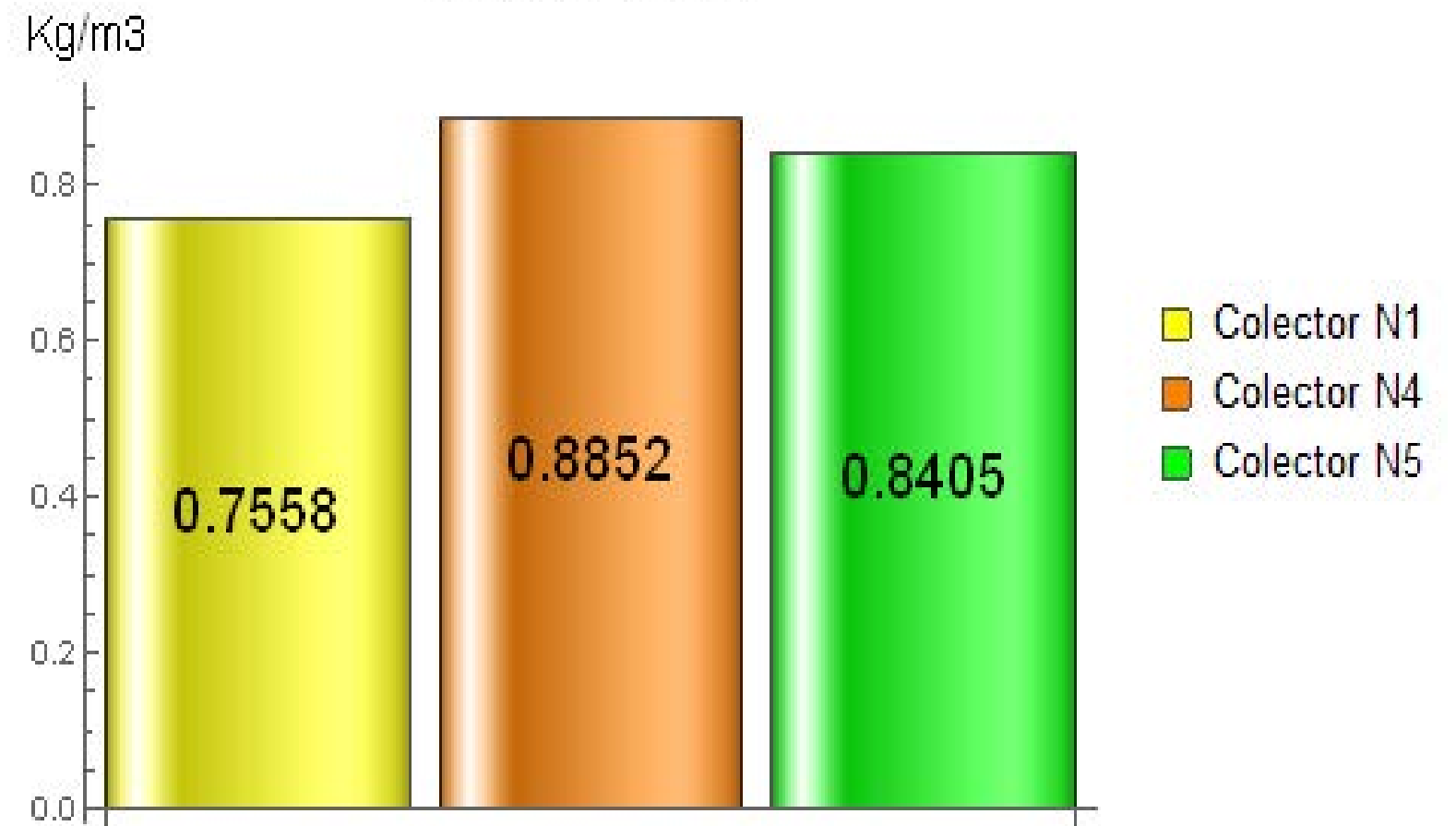
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados obtenidos de la simulación del fluido en los tres colectores construidos

Temperatura Máxima



Densidad Máxima

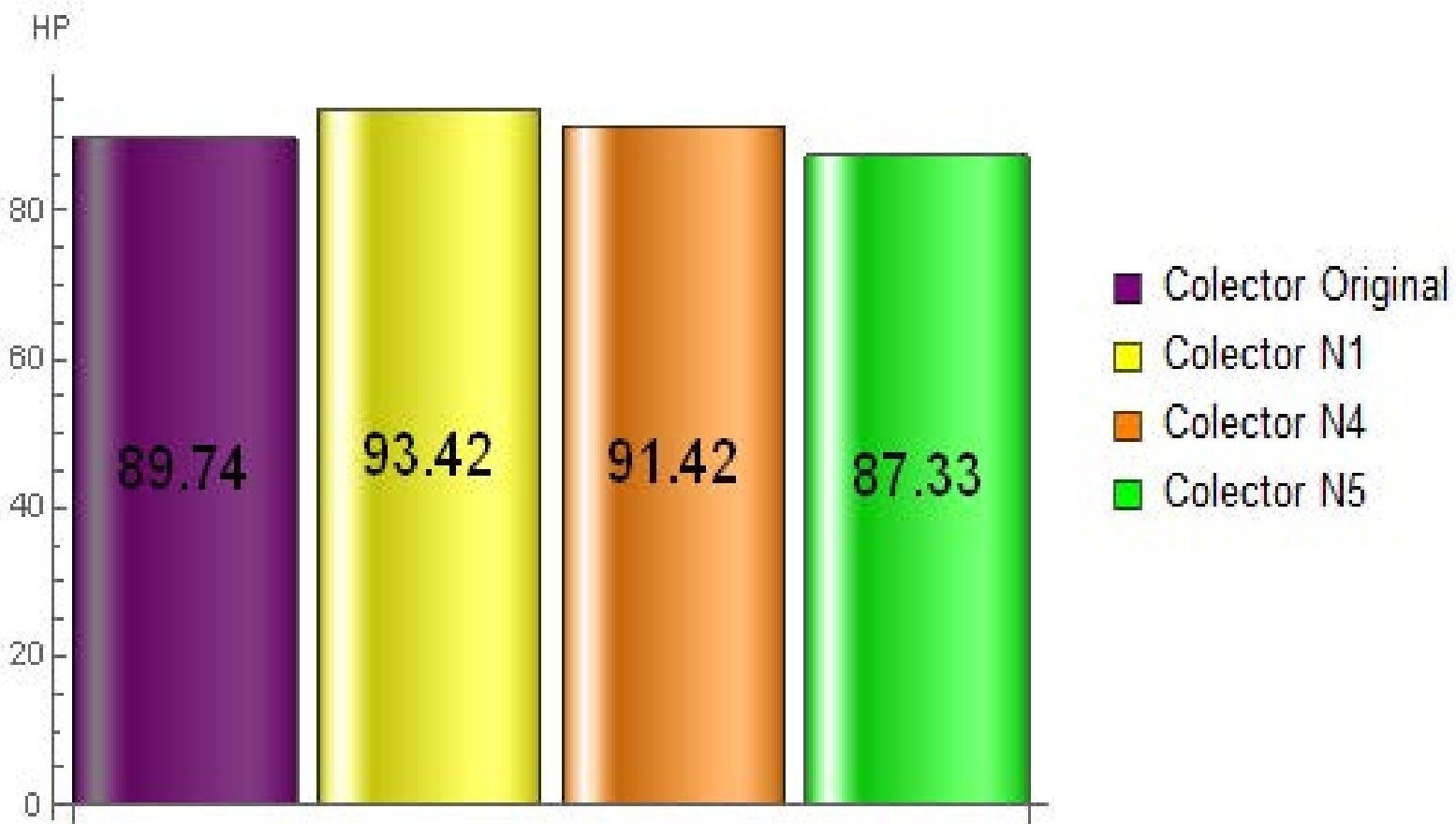




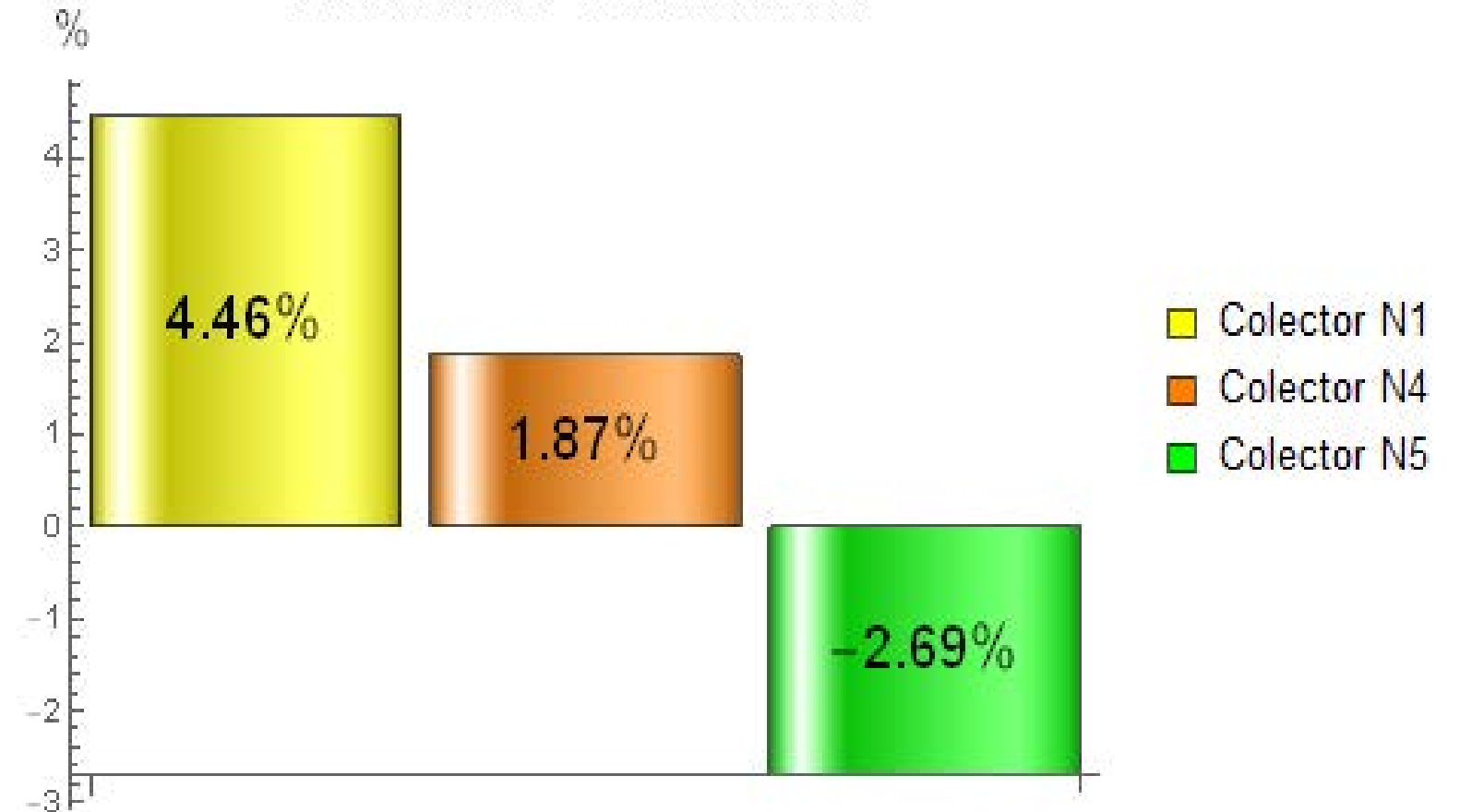
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados obtenidos en el banco dinamométrico

Potencia Máxima



Variación de Potencia Máxima

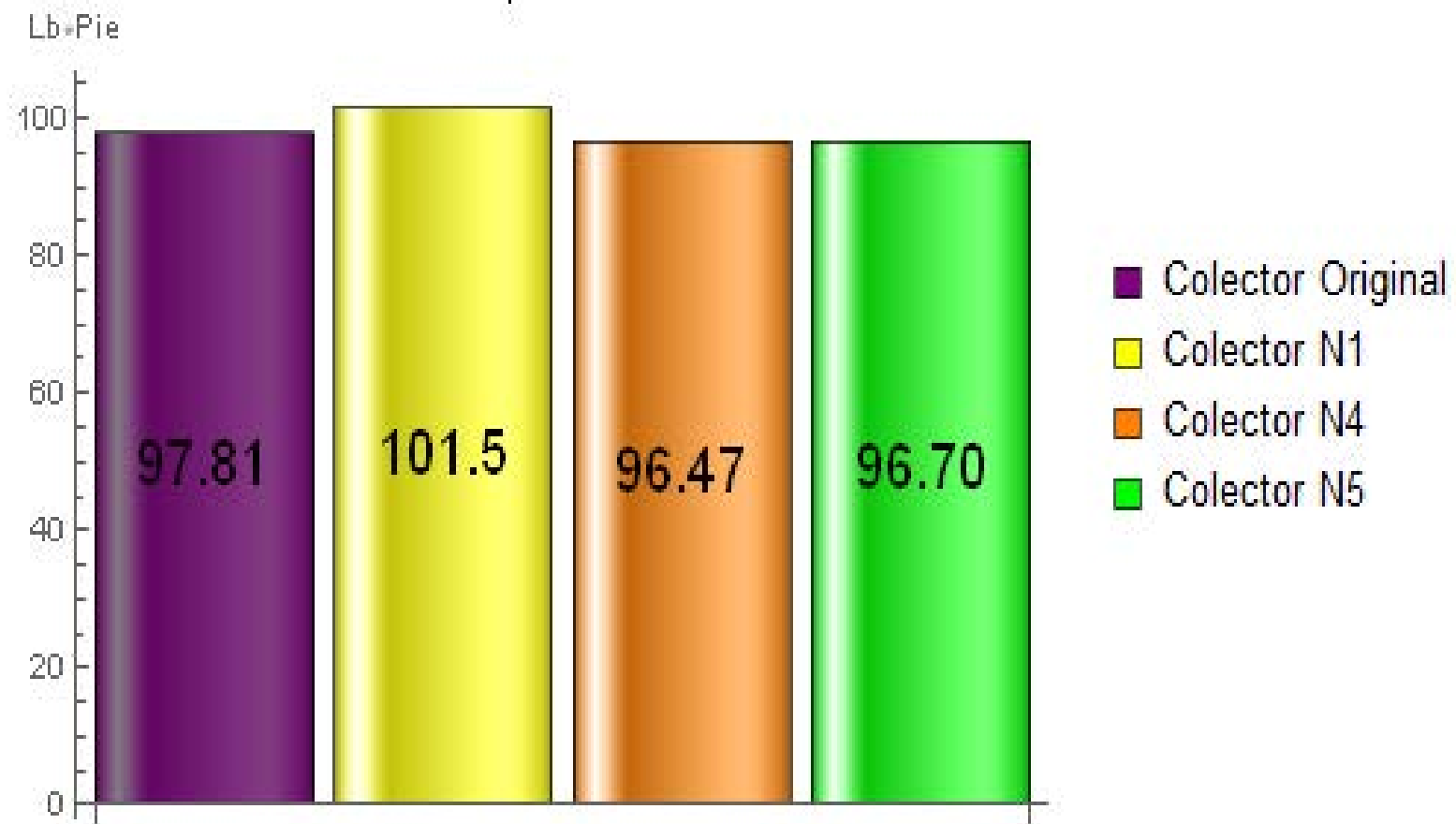




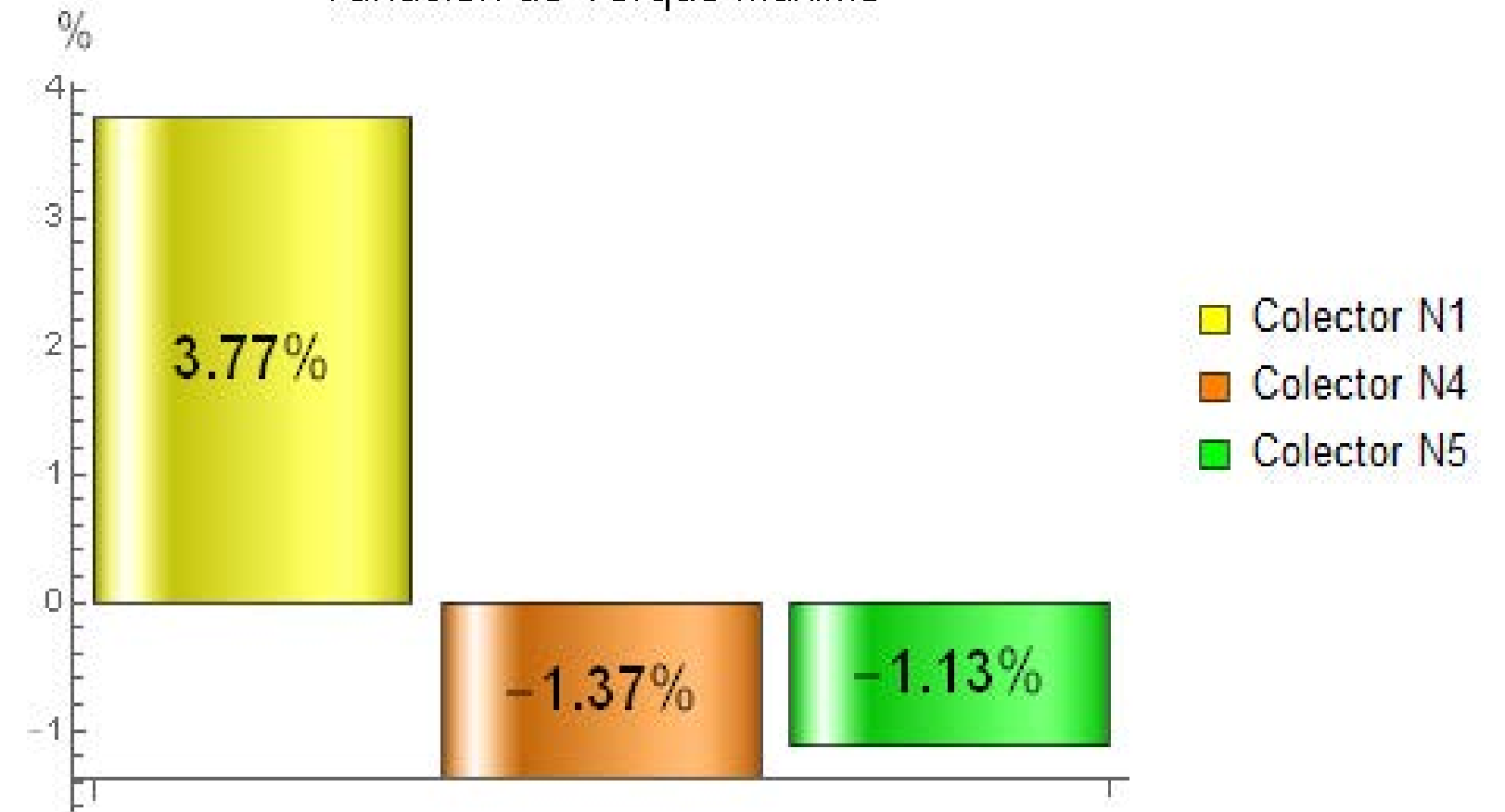
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados obtenidos en el banco dinamométrico

Torque Máximo



Variación de Torque Máximo

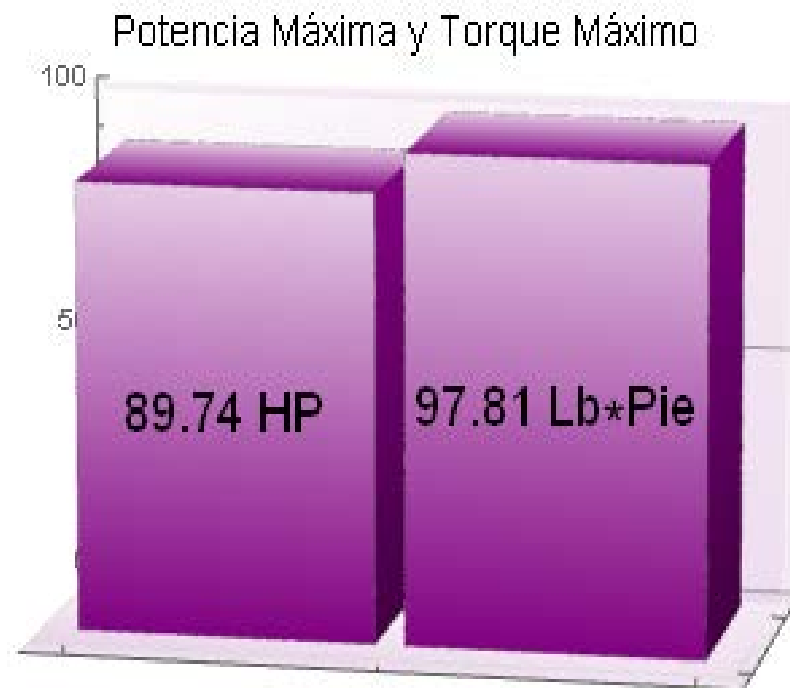




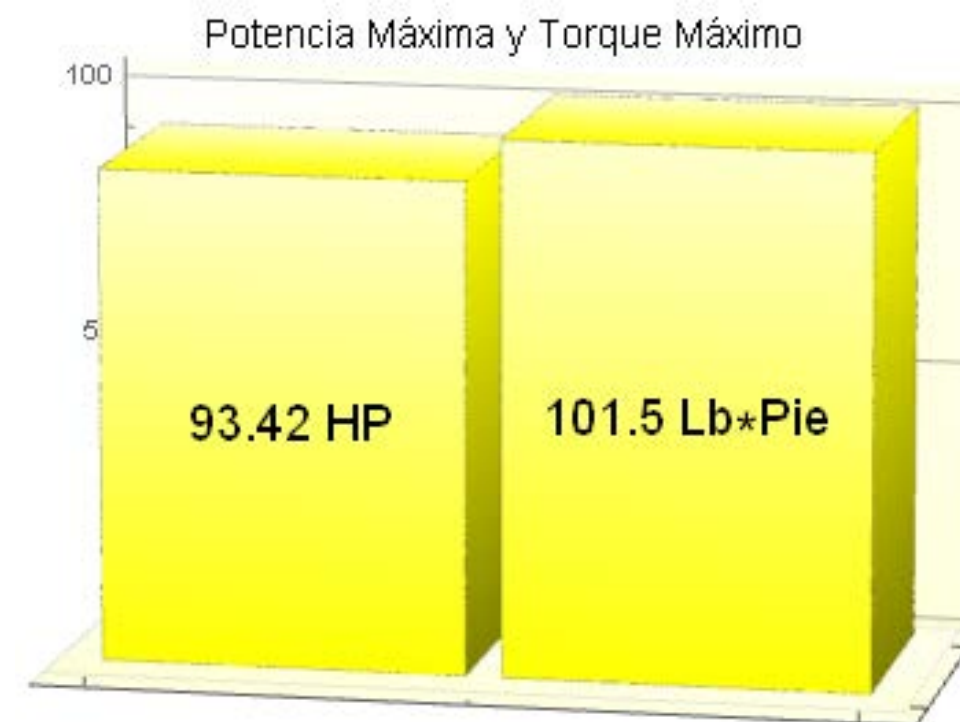
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados obtenidos en el banco dinamométrico

Colector Original



Colector N1





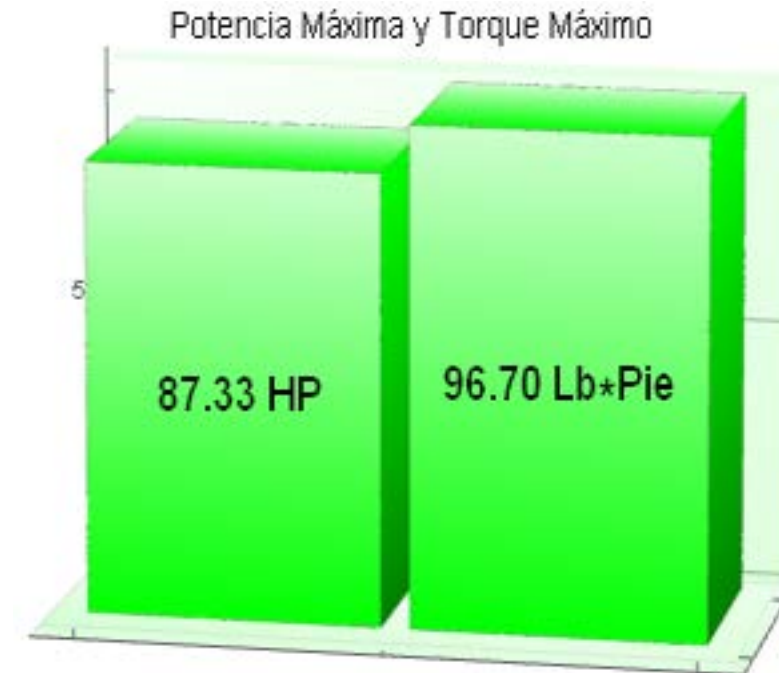
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados obtenidos en el banco dinamométrico

Colector N4



Colector N5





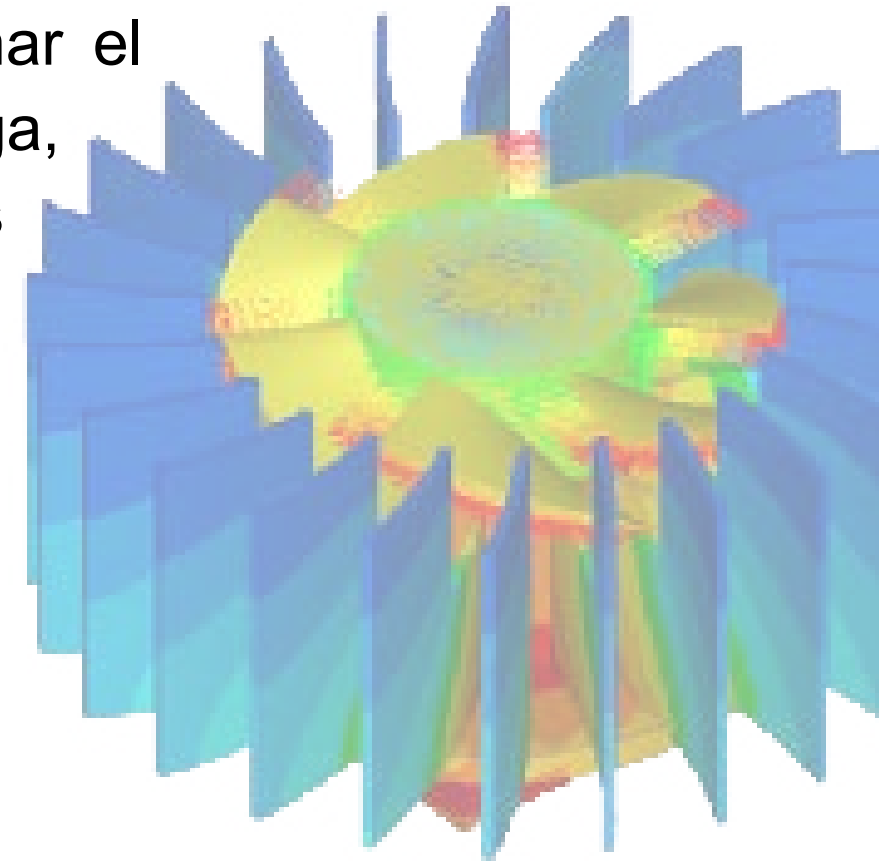
CONCLUSIONES

- Para desarrollar análisis en ingeniería en la mayoría de los casos se requiere un fundamento matemático que sustente las asunciones e idealizaciones que la aplicación requiera, tanto es así que en el presente estudio se justificó la geometría de las propuestas de diseño para el estudio de los colectores mediante graficación de funciones matemáticas.
- En el presente estudio se establecieron las variables termo mecánicas que sirven de base y fundamento para el desarrollo del modelo matemático e idealizaciones que sustentan las geometrías propuestas obtenidas y cuya comprobación y validación fue realizada mediante la graficación de funciones matemáticas.
- Se establecieron cinco tipos diferentes de geometría de colectores, cuatro definidos por la función raíz (N1, N2, N3 y N4) y una definida por la función de la circunferencia (N5) en un dominio de 0 a 10 cm y en un rango máximo de 0 a 15 cm de acuerdo al espacio físico alrededor del motor.



CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un método de análisis para determinar la variabilidad en el comportamiento de un motor de combustión interna cuando existe diferentes geometrías en los ductos de salida de gases combustionados. Fue requerido comparar resultados de análisis computacionales versus ensayos físicos de esta manera se ha conseguido establecer la valides de este proceso.
- Se desarrolló y aplicó un método de análisis euleriado para proyectar y determinar el comportamiento y variabilidad que sufre la potencia, el torque y la velocidad de descarga, en un motor de combustión interna al existir diferentes geometrías en los ductos de salida de gases combustionados, parámetros que fueron evaluados analítica y computacionalmente y validados al comparar con resultados obtenidos al realizar ensayos físicos.





CONCLUSIONES

- Las ecuaciones de transporte aplicadas han constituido una manera analítica para determinar una solución cuando un flujo de gases combustionados atraviesa un colector, mencionada ecuación ha servido para establecer la verificación y comparación de resultados mediante la aplicación computacional basada en el método de volúmenes finitos.
- En base a los análisis realizados se determina que: cuando en un colector el radio de dobles (arco generado) que permite caracterizar la geometría del ducto, se presenta más abierto (con un mayor valor) incide en el comportamiento del motor de tal manera que se incrementa en aproximadamente un 4% y 5% el torque y potencia del motor respectivamente. Esto permite concluir que se puede tomar control de ciertos parámetros del motor de combustión interna si se afecta directamente la forma geométrica del colector.
- El modelo matemático considera que el flujo recorre una geometría recta por lo cual los valores de las ecuaciones de transporte se aproximan a la geometría N1.



CONCLUSIONES

- El método de volúmenes finitos permite analizar con una aceptable aproximación a los resultados reales del fenómeno interno que se genera en un colector de escape, gracias a la configuración adecuada de malla (discretización), la que tuvo un intervalo de volumen finito aproximado de 1mm.
- Los resultados obtenidos en la simulación del colector N5 no se aproximan a los resultados físicos, siendo la configuración que presenta la mayor variación respecto al análisis computacional.