

**Diseño de los sistemas de admisión y escape del  
Motor Rotativo de Combustión a Volumen  
Constante**



**NICOLÁS DANIEL BARRIOS**

**PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad  
Nacional del Comahue como requisito para la obtención del  
grado de

**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

AÑO 2023

**Diseño de los sistemas de admisión y escape del  
Motor Rotativo de Combustión a Volumen  
Constante**

**NICOLÁS DANIEL BARRIOS**

Director: Ing. **EZEQUIEL JOSE LÓPEZ**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional  
del Comahue como requisito para la obtención del grado de

**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

AÑO 2023

**Diseño de los sistemas de admisión y escape del  
Motor Rotativo de Combustión a Volumen  
Constante**

**NICOLÁS DANIEL BARRIOS**

Aprobado en fecha X de XXXXX de 2023

Tribunal evaluador:

- Ing. APELLIDO, Nombre.
- Ing. APELLIDO, Nombre.
- Ing. APELLIDO, Nombre.

# Diseño de los sistemas de admisión y escape del Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante

Autor: Nicolás Daniel Barrios

Director: Ezequiel Jose López

## Resumen

En este trabajo se realizó una optimización de los sistemas admisión y escape del Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante (MRCVC), utilizando herramientas de simulación computacional como ICESym, un simulador de motores de combustión interna con modelos 0D/1D; OpenFOAM, la herramienta libre de CFD; un optimizador basado en un algoritmo genético (AG) desarrollado a base de la librería DEAP (Python) para funcionar en conjunto con ICESym; entre otros.

Como primera instancia se desarrolló una librería de funciones que acoplaron al AG con ICESym, permitiendo: configurar, ejecutar y procesar los datos de salida del simulador de motores.

También se realizaron algunas modificaciones a ICESym, siendo la más importante el agregado de un modelo de coeficientes de descarga ( $C_D$ ) dependiente de dos variables: presión y apertura de puerto. Esto permitió agregar como dato de entrada un mapa de  $C_D$  para tener un mejor modelado del funcionamiento de los puertos.

Se realizó una primer optimización de la geometría de los puertos del MRCVC con valores de  $C_D$  asumidos constantes, de aquí se obtuvo un diseño preliminar de los puertos que fue modelado en CAD con el programa FreeCAD, esto junto con el estado termodinámico del gas obtenido de los datos de salida de ICESym, se utilizó para realizar flujometrías con OpenFOAM de los puertos en diferentes regímenes de funcionamiento del motor y así obtener el mapa de  $C_D$ . Este mapa se utilizó como retroalimentación del AG para una nueva optimización de los sistemas de intercambio de gases, obteniendo como resultado una geometría de los puertos que se considera satisfactoria para el estado actual de desarrollo del motor.

*Palabras clave:* MRCVC, Rendimiento volumétrico, Sistemas de intercambio de gases, Flujometrías, Optimización, Algoritmo Genético.

# Intake and Exhaust gas exchange systems design for the Constant Volume Rotary Engine

Author: Nicolás Daniel Barrios

Advisor: Ezequiel Jose López

## Summary

This document presents the optimization of the Constant Volume Combustion Rotary Engine gas exchange systems, this was achieved using free and open source tools such as ICESym, an Internal Combustion Engine Simulator with 0D/1D models; OpenFOAM, the open source CFD tool; a genetic optimization algorithm (GA) tailored to work with ICESym, based on the DEAP Python library, among others.

A first step was developing a Python library to allow the GA to configure, run and read ICESym. Also, an objective function was defined to evaluate individual and specific engine configuration performance.

To allow the GA to work with ICESym, some modifications to the source code were made for easier communication with the optimization functions. A better modeling of the gas exchange process was made by adding functionality to ICESym that takes into account a discharge coefficient map dependant on pressure differential across the port and port opening area. Using constant value discharge coefficients for the intake and exhaust ports, a first optimization run was made that resulted in a pre-optimized geometry that was modeled with FreeCAD.

This 3D CAD model of the port geometry was used with gas state data taken from ICESym results to make CFD runs. With these results the mass flow rate was obtained in a variety of engine position and states to build a DC map. This map was used as an ICESym input to have a better flow model of the gas through the ports.

Lastly this map was used in a second optimization run to obtain the final geometry.

*Keywords:* MRCVC, Volumetric efficiency, Gas exchange systems, CFD, Optimization, Genetic algorithm

# Índice general

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1 Motores de combustión Interna . . . . .	5
2.1.1 Motores rotativos . . . . .	7
2.1.2 Parámetros Operativos e Indicadores de rendimiento . . . . .	8
2.1.3 Presión Media Efectiva . . . . .	10
2.1.4 Rendimiento Volumétrico . . . . .	11
2.1.5 Fracción de gases residuales . . . . .	14
2.1.6 Coeficiente de descarga . . . . .	14
2.1.7 Sincronización del sistema de admisión . . . . .	16
2.1.8 Sincronización del sistema de escape . . . . .	17
2.1.9 Combustión . . . . .	18
2.1.10 Propiedades termodinámicas de mezclas aire-combustible . . . . .	21
2.2 Geometría y Ciclo Operativo del MRCVC . . . . .	24
2.2.1 Sistemas de intercambio de gases . . . . .	25
2.3 Flujométrías y CFD . . . . .	28
2.3.1 Modelos de turbulencia . . . . .	28
2.3.2 Condiciones Iniciales . . . . .	29
2.3.3 Malla . . . . .	31
2.3.4 Coeficiente de descarga $C_D$ . . . . .	32
<b>3 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES</b>	<b>35</b>
3.1 Internal Combustion Engine Simulator . . . . .	35
3.2 Modificaciones a ICESym . . . . .	35
3.2.1 Flujo a través de los puertos . . . . .	35
3.2.2 Área de referencia . . . . .	39
3.2.3 Interfaz con optimizador . . . . .	42

3.3	Optimizador y Algoritmo Genético . . . . .	43
3.3.1	Población . . . . .	45
3.3.2	Reproducción . . . . .	46
3.3.3	Cruza . . . . .	46
3.3.4	Mutación . . . . .	48
3.3.5	Función objetivo . . . . .	48
3.4	OpenFOAM . . . . .	51
3.4.1	Metodología . . . . .	51
3.4.2	Configuración . . . . .	52
<b>4</b>	<b>DESARROLLO</b>	<b>60</b>
4.1	Primer Iteración . . . . .	60
4.2	Modelo de CAD . . . . .	62
4.3	Flujometrías . . . . .	64
4.3.1	Puerto de Admisión . . . . .	65
4.3.2	Puerto de Escape . . . . .	66
4.4	Segunda iteración y resultado final . . . . .	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>ANEXO I</b>	<b>77</b>

# Índice de figuras

1.1	Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante . . . . .	1
2.1	Motor 1909 5HP Otto Special Electric Lighting de Wayne Grenning .	5
2.2	Ciclo de cuatro tiempos . . . . .	7
2.3	<i>bmepl</i> , torque y potencia vs velocidad de operación(Heywood, 2018). .	11
2.4	Área de cortina . . . . .	15
2.5	(cambiar por una del mrcvc) Diagrama de presión vs ángulo de cigüeñal	16
2.6	Diagramas P-V para ciclos ideales(Heywood, 2018) . . . . .	18
2.7	Rendimiento de conversión de combustible en función de $r_c$ para ciclos de gas ideal de volumen constante, presión constante y presión limitada(cambiar por propia??) . . . . .	20
2.8	Diagrama P-V del MRCVC . . . . .	25
2.9	Ciclo operativo del MRCVC . . . . .	26
2.10	Esquema del sistema de intercambio de gases . . . . .	26
2.11	Puerto de escape . . . . .	27
2.12	Solape de cámaras . . . . .	30
2.13	Área de referencia . . . . .	33
3.1	Interpolación bilineal de $\sin(\sqrt{x^2 + y^2})$ . . . . .	38
3.2	Comparación de interpolaciones . . . . .	41
3.3	Individuo como binario . . . . .	46
3.4	Cruza de dos puntos . . . . .	47
3.5	Curvas de rendimiento volumétrico aserradas . . . . .	49
3.6	Esquema de directorios OpenFOAM . . . . .	53
3.7	Presión en función de la apertura el puerto, $\Delta P = f(l_v)$ . . . . .	54
3.8	Puerto de admisión $\theta = 50^\circ$ Modelado con FreeCAD . . . . .	55
3.9	Malla hermética . . . . .	55
3.10	Nombres de Nombres de Parches . . . . .	56
3.11	Diferentes mallas para flujometrías . . . . .	57

3.12 Malla de blockMesh y stl de Salome . . . . .	58
3.13 Pasos de SnappyHexMesh(Montorfano, 2015) . . . . .	58
4.1 Primer Iteración . . . . .	61
4.2 Torque y Potencia de Primer Iteración . . . . .	61
4.3 CAD Primer Iteración . . . . .	63
4.4 CAD Primer iteración (vistas fuera de escala). . . . .	64
4.5 Flujometrías puerto de admisión . . . . .	65
4.6 Flujometrías puerto de escape . . . . .	66
4.7 Puerto de admisión 10° 7000RPM . . . . .	67
4.8 Puerto de admisión . . . . .	67
4.9 Puerto de escape . . . . .	68
4.10 Admisión - Valor máximo de $C_D$ . . . . .	68
4.11 Admisión - Valor mínimo de $C_D$ . . . . .	69
4.12 Admisión - Valor máximo de $\dot{m}$ . . . . .	69
4.13 Escape - Valor máximo de $C_D$ . . . . .	70
4.14 Escape - (CAMBIAR POR CD MIN) Valor mínimo de $C_D$ . . . . .	71
4.15 Escape - Valor máximo de $\dot{m}$ . . . . .	71
4.16 Flujometrías para el puerto de Admisión . . . . .	72
4.17 Segunda Iteración . . . . .	72
4.18 Torque y Potencia de Segunda Iteración . . . . .	73

## Índice de tablas

2.1	Geometría del MRCVC . . . . .	25
3.1	Parámetros que representan al motor . . . . .	45
3.2	Configuración de mallas mostradas en la figura 3.11 . . . . .	57
4.1	Configuración utilizada. . . . .	62
4.2	Mejor Candidato. . . . .	63
4.3	Geometrías de segunda iteración . . . . .	70
7.1	Mapa de $C_d$ del puerto de Admisión . . . . .	78
7.2	Mapa de $C_D$ del puerto de escape . . . . .	79

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se obtuvo un diseño preliminar de la geometría de los sistemas de intercambio de gases del Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante ([Toth, 2004](#)), con el objetivo general de maximizar la eficiencia del sistema en un rango de velocidades del motor.

El MRCVC es un proyecto que surgió en la Universidad Nacional del Comahue, inventado y patentado por Jorge Toth en el año 2004, este proyecto nace en el marco del *Proyecto de Investigación Desarrollo de modelos y herramientas para la simulación de problemas complejos en ingeniería mediante fluido dinámica computacional (04/I-251)* y actualmente se encuentra en etapa de desarrollo.

En trabajos anteriores ([López, Cañón y Sarraf, 2016](#))([López, Cañón y Nigro, 2013](#)) se han mencionado las características que hacen al MRCVC un motor atractivo, la geometría de la cámara de combustión y del conjunto rotante permiten que gran parte del proceso de combustión se realice a volumen constante, además de tener un balanceo mecánico de fuerzas que le permite alcanzar altas velocidades de rotación. Esto permite un funcionamiento más suave del motor, además de una reducción del ruido y desgaste en comparación a motores rotativos tradicionales (Wankel) y reciprocatores. Por otro lado hay que mencionar que los motores rotativos traen consigo una serie de problemas como la necesidad de introducir aceite a

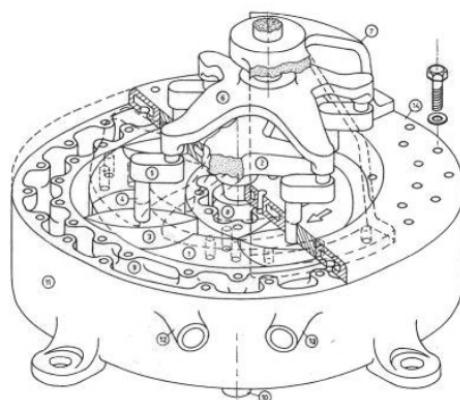


Figura 1.1. Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante

la cámara de combustión para lubricar elementos móviles, el solape de cámaras durante la apertura de los puertos y en particular al MRCVC un complejo sistema de sellos ([Roldán, 2020](#)).

La motivación de este trabajo surge del deseo de continuar con el desarrollo del MRCVC, en particular mejorar el pre-diseño de los sistemas de intercambio de gases, sentando la base para una futura optimización de los mismos en un motor con requisitos de diseño concretos.

Se busca obtener un pre-diseño satisfactorio del sistema, en particular de la geometría de los puertos de admisión y escape, definiendo las métricas a utilizar para medir la eficiencia del sistema y poder realizar comparaciones cuantitativas de los diseños propuestos. Debido al costo computacional de las simulaciones necesarias para realizar esta optimización se restringe el modelado de la geometría a definir posiciones angulares, largos y diámetros. No se repara en detalles como la forma de la transición entre las paredes del puerto hacia la cámara de combustión, el ángulo del puerto respecto al estator y detalles similares.

La optimización se realizó utilizando en conjunto una serie de herramientas de simulación, de las cuales las principales fueron:

1. ICESym ([Nigro et al., s.f.](#)), simulador de motores de combustión interna.
2. OpenFOAM ([Foundation, s.f.](#)), la herramienta libre de CFD.
3. Salome ([Open Cascade, s.f.](#)), plataforma libre para simulación numérica.

Se desarrolló un sencillo optimizador capaz de generar y evaluar diferentes geometrías con el fin de buscar una combinación de parámetros que maximicen indicadores de *performance* del sistema, como por ejemplo, el rendimiento volumétrico del motor para un rango de velocidades determinado.

El proceso de optimización consta de una primer aproximación utilizando como punto de partida los resultados de trabajos anteriores ([López, Cañón y Nigro, 2013](#)), en los cuales se evaluó el funcionamiento de los parámetros que definen la geometría de los sistemas de intercambio de gases, en particular: diámetros, longitudes y reglaje o posición angular de los puerto.

La optimización se realiza con un algoritmo evolutivo (o genético) funcionando en conjunto con ICESym, este último provee el puntaje a cada motor necesario para estos procesos de optimización. El puntaje se introduce en la función objetivo, la cual evalúa y cada uno de los candidatos generados por el algoritmo.

El diseño preliminar de la primer ronda de optimización se volcó en un modelo 3D de los puertos, parametrizado de modo tal que se puede alterar rápidamente la geometría, modificando variables como el diámetro de los conductos y la posición relativa en el motor. Este modelo de 3D se utilizó para extraer la geometría a simular con OpenFOAM, para realizar las flujometrías que devuelvan el flujo másico ( $\dot{m}$ ) en estado estacionario de un punto operativo del motor, es decir, para una combinación de diferencia de presión puerto-cámara y grado de apertura del puerto. El flujo másico se utilizó para medir la eficiencia con la cual escurre el gas a través del puerto, por medio del *coeficiente de descarga* o  $C_D$ .

El objeto de estas flujometrías es crear un mapa del  $C_D$  en función de las variables mencionadas: apertura de puerto y diferencia de presión. El mapa se utilizará como retroalimentación del simulador de motores ICESym, para tener un mejor modelado del flujo de gas a través de los puertos en un rango operativo del motor y con esto realizar una nueva corrida de optimización para refinar el diseño obtenido en la primer iteración.

La organización de este trabajo es como sigue, en el presente capítulo se dio una introducción al trabajo, motivación y objetivos del mismo.

En el segundo capítulo se da una breve descripción del funcionamiento de los motores de combustión interna, seguido de los indicadores utilizados para medir el rendimiento de motores en general e indicadores particulares de la eficiencia de los sistemas de intercambio de gases, como el rendimiento volumétrico y la fracción de gases residuales. Luego, se describe el funcionamiento del MRCVC, indicando los aspectos que hacen atractivo a este motor, además de desventajas del mismo y las posibles aplicaciones. También se describe el proceso de intercambio de gases y se define el coeficiente de descarga  $C_D$  y las ecuaciones asociadas.

Finalmente se presentan las flujometrías a realizar, modelos de turbulencia utilizados y las condiciones iniciales y de contorno utilizadas en las simulaciones.

En el tercer capítulo se describe la parte computacional del trabajo, se presenta el simulador de motores *ICESym*, el optimizador desarrollado y la integración entre ambos programas. Seguido de una descripción del funcionamiento del optimizador, los motivos de seleccionar un algoritmo de tipo evolutivo o genético, las ventajas y desventajas, los componentes básicos y finalmente la implementación del mismo.

En este capítulo también se presenta el software utilizado para realizar las flujometrías, *OpenFOAM*, la implementación de las condiciones iniciales y de contorno, extracción de datos de *ICESym* y otras herramientas necesarias para generar el modelo de CAD del puerto, malla y otros detalles relativas al proceso de utilizar el programa.

En el cuarto capítulo presenta el desarrollo del trabajo, dando los resultados de cada etapa.

Por último, se dan las conclusiones del trabajo, opiniones finales y una perspectiva a futuro o posibles trabajos a seguir.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Motores de combustión Interna

Los motores de combustión interna dieron un impulso a la actividad humana desde los años 1860, donde su uso comercial comenzó a popularizarse. La función de estos dispositivos es la de convertir la energía potencial del fluido de trabajo, una mezcla de aire-combustible, en trabajo mecánico por medio de un proceso de combustión controlada dentro de un cilindro (cámara de combustión). Los primeros ejemplares comerciales eran voluminosos, costosos, altamente ineficientes y de baja potencia, con valores de rendimiento cercano al 5% y potencias de hasta 6 HP.

Un paso importante hacia los motores actuales fue el desarrollo del ciclo Otto, propuesto por Nicolaus A. Otto y Eugen Langen, cuyo primer prototipo se puso en marcha en el año 1876. Otto propuso un motor alternativo con cuatro carreras de pistón: admisión, compresión, expansión y escape (ver figura 2.2a); este prototipo lograba la misma potencia con mayor eficiencia que los motores de la época con menos de la mitad del peso y volumen. En la figura 2.1 se ve un motor de ciclo Otto fabricado por *Otto Gas Engines Works* en el año 1909 en Filadelfia-EEUU, según

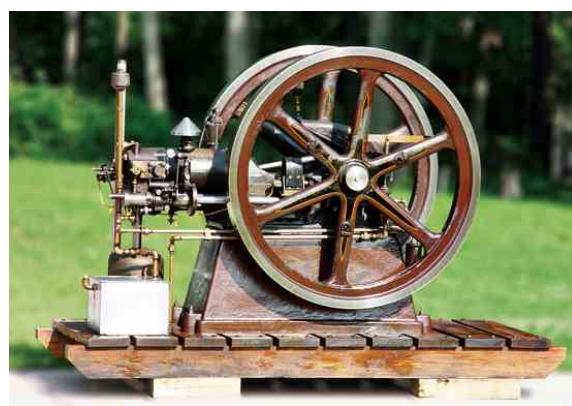


Figura 2.1. Motor 1909 5HP Otto Special Electric Lighting de Wayne Grenning  
<https://www.gasenginemagazine.com/gas-engines/1909-5-hp-otto-special-electric/>

la revista *Gas Engine Magazine*<sup>1</sup> <sup>2</sup> <sup>3</sup> este motor funcionaba directamente acoplado a una bomba triplex de agua, como parte de un sistema de irrigación de un club de campo de Delaware. Los motores han continuado su desarrollo desde entonces, mejorando materiales, combustibles y procesos de manufactura entre otros aspectos. En las últimas décadas se ha hecho foco en disminuir el consumo de combustible, el nivel de ruido, costo de manufactura, tamaño y las emisiones de gases de efecto invernadero o contaminantes como las de  $CO_2$ ,  $CO$  y  $NO_x$ , entre otras.

El ciclo operativo de cuatro tiempos de Otto se puede expresar en términos de carreras del pistón, en la que pueden identificar dos posiciones de interés: punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI). En el PMS se tiene el volumen mínimo atrapado en el cilindro y el pistón está al final de la carrera, en el punto más alejado del eje del cigüeñal. El PMI es el punto en el que se tiene el volumen máximo del cilindro y el pistón está en el punto más cercano al eje del cigüeñal, como se ve en la figura 2.2b. Con esto en mente, el ciclo Otto de cuatro tiempos de un motor de encendido por chispa se puede describir con cuatro carreras del pistón:

**Carrera de admisión** El pistón se mueve desde el PMS hasta el PMI con la válvula de admisión abierta y la de escape cerrada, esto hace que ingrese una masa de aire-combustible al cilindro.

**Carrera de compresión** El pistón se mueve desde el PMI hacia el PMS con la válvula de admisión y escape cerradas, esta reducción del volumen comprime y calienta los gases en el interior del cilindro. En una posición angular del ciclo conocida como avance de encendido se enciende la mezcla.

**Carrera de potencia o expansión** La combustión produce un aumento de presión y temperatura en el cilindro, la carrera de expansión parte del PMS hacia el PMI, aprovechando la expansión en volumen de los productos de la combustión que producen trabajo sobre la cara del pistón.

<sup>1</sup><https://www.gasenginemagazine.com/gas-engines/1909-5-hp-otto-special-electric/>

<sup>2</sup><https://www.youtube.com/watch?v=LPSWfg0Y3Hs>

<sup>3</sup>[https://www.youtube.com/watch?v=0d0WZ0H56\\_U](https://www.youtube.com/watch?v=0d0WZ0H56_U)

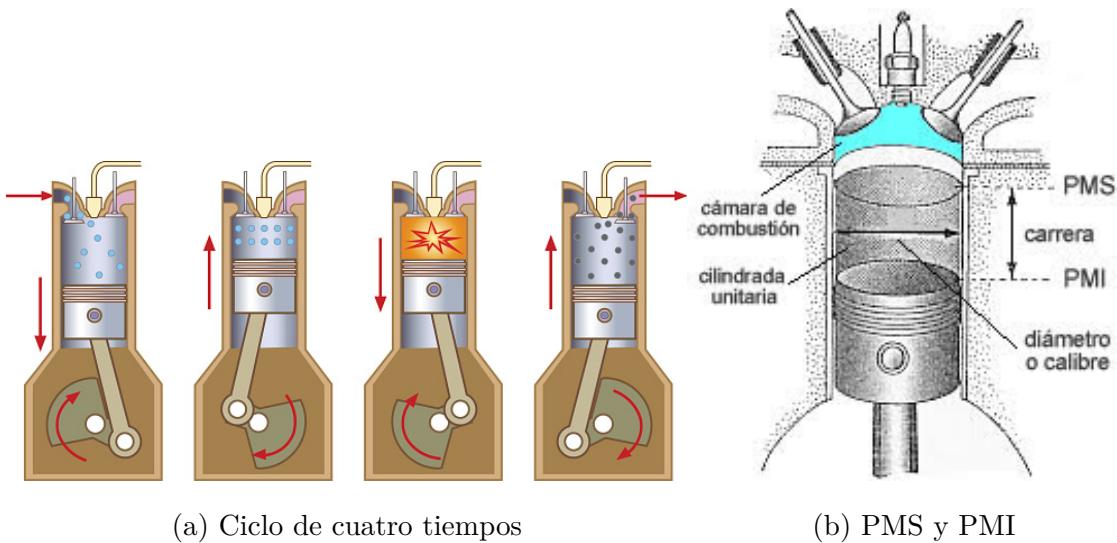


Figura 2.2. Ciclo de cuatro tiempos

**Carrera de escape o barrido** Luego de la carrera de expansión, en el PMI se abre la válvula de escape y el movimiento del pistón hacia el PMS produce un barrido de los gases quemados.

### 2.1.1 Motores rotativos

Los motores rotativos son una variable al diseño más popular de los motores alternativos, su compacidad, balanceo y mayores velocidades de giro los vuelven más atractivos en aplicaciones en las cuales el volumen es restringido. La mayor velocidad de giro permite alcanzar mayores potencias por lo que tiene una menor relación peso/potencia que motores reciprocatos de potencia similar. El motor rotativo más conocido es el Wankel, cuyo primer prototipo funcional se desarrolló cerca del 1957. En la actualidad se cuenta con otros desarrollos de este tipo de motores como el motor rotativo de pistón líquido, con un ciclo de combustión a volumen constante denominado HECH([Shkolnik, 2005](#)), similar al del MRCVC.

Si bien son una alternativa interesante a los motores reciprocatos, estos motores requieren introducir aceite en la cámara de combustión para lubricar las partes móviles, además tienen una mayor superficie de transferencia de calor por lo que la pérdida de calor es mayor en comparación con los reciprocatos. En la actualidad, los requisitos de niveles de emisiones ambientales de ciertos gases hacen de estos

motores inviables para el uso comercial, sin embargo la compacidad del motor los vuelve atractivos en aplicaciones militares como por ejemplo para vehículos aéreos no tripulados.

### 2.1.2 Parámetros Operativos e Indicadores de rendimiento

Para poder comparar entre diferentes diseños de motores se deben conocer algunos parámetros operativos e indicadores de rendimiento, algunas de las características más importantes de un motor son:

1. Potencia máxima
2. Torque máximo
3. Rango de velocidades de operación
4. Consumo de combustible, costo del combustible
5. Costo inicial, costo de operación, costo de mantenimiento
6. Confiabilidad
7. Ruido y emisiones contaminantes

Estas características se pueden expresar de manera más genérica en función de la potencia, geometría u otros aspectos de un motor para obtener valores que se pueden comparar directamente entre motores. Por ejemplo, al cociente entre el trabajo entregado por ciclo y la cilindrada de un motor se lo conoce como presión media efectiva o *mep*, por sus siglas en inglés. Algunos parámetros operativos e indicadores se describen en los párrafos siguientes.

#### 2.1.2.1 Volumen Desplazado

El volumen desplazado se define como la diferencia entre el volumen máximo y mínimo que ocupa la cámara de combustión.

$$V_d = V_{max} - V_{min} \quad (2.1)$$

### 2.1.2.2 Relación de compresión

Se define como el cociente entre el volumen máximo y el volumen mínimo del ciclo, es uno de los parámetros más importantes de un motor ya que afecta la presión máxima que se puede obtener en la cámara, la *performance* potencia entregada, esfuerzos mecánicos y rendimiento del motor.

$$r_c = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.2)$$

### 2.1.2.3 Trabajo indicado por ciclo

El trabajo entregado por el cilindro al cigüeñal por cada ciclo de operación del mismo se denomina trabajo indicado por ciclo y se obtiene al integrar la presión en función del volumen, es el área encerrada en un diagrama de P-V del motor.

$$W_{c,i} = \oint PdV \quad (2.3)$$

Se debe diferenciar entre trabajo bruto y trabajo neto, en el último se tiene en cuenta el trabajo de bombeo que resulta de la diferencia del trabajo realizado durante las carreras de admisión y escape, por lo que este indicador se puede diferenciar en:

**Trabajo bruto indicado por ciclo**  $W_{c,ig}$ , mide el trabajo realizado por el motor en las carreras de compresión y expansión.

**Trabajo neto indicado por ciclo**  $W_{c,in}$ , mide el trabajo realizado por el motor considerando las 4 carreras del ciclo.

**Trabajo de bombeo** La diferencia entre el trabajo bruto y neto es el trabajo de bombeo  $W_{bombeo}$  y mide el trabajo realizado durante los procesos de admisión y escape.

**Trabajo de fricción** Es el trabajo consumido por el rozamiento entre partes móviles del motor.

### 2.1.2.4 Consumo específico de combustible y rendimiento de conversión de combustible

El consumo específico de combustible  $sfc$ , se define como el cociente entre el caudal másico de combustible ( $\dot{m}_f$ ) consumido por unidad de potencia  $P$  entregada por el motor.

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2.4)$$

Mide la eficiencia con la que el motor utiliza el combustible para una condición de operación dada, para motores de encendido por chispa se tienen valores típicos para de alrededor de  $65\mu g/J$ .

Una versión similar de este indicador adimensionalizado en relación a la energía suministrada por el combustible, es el *rendimiento de conversión de combustible*  $\eta_f$ , que se relaciona al  $sfc$  por medio del poder calórico del combustible,  $Q_{HV}$ .

$$\eta_f = \frac{1}{sfc \cdot Q_{HV}} \quad (2.5)$$

El valor de  $Q_{HV}$  es una propiedad del combustible que se determina en un ensayo de laboratorio, valores típicos para los combustible comerciales basados en hidrocarburos son 42 a 44  $MJ/kg$

### 2.1.3 Presión Media Efectiva

La presión media efectiva o *mep* por sus siglas en inglés es un indicador cuya variación es similar a la curva de torque pero adimensionalizada por el tamaño de cada motor. El trabajo realizado por ciclo se puede calcular como  $W_c = \frac{P \cdot n_r}{N}$ , donde  $n_r$  es el número de revoluciones del cigüeñal por cada carrera de expansión por cilindro. Para motores de cuatro tiempos  $n_r = 2$  y  $n_r = 1$  para motores de dos tiempos, con esto la presión media efectiva se define como:

$$mep = \frac{W_c}{V_d} = \frac{P \cdot n_r}{V_d \cdot N} \quad (2.6)$$

Se puede diferenciar entre presión media efectiva indicada (*imep*), al freno (*bemp*) y de fricción (*fmeep*), utilizando el valor de potencia correspondiente en la ecuación

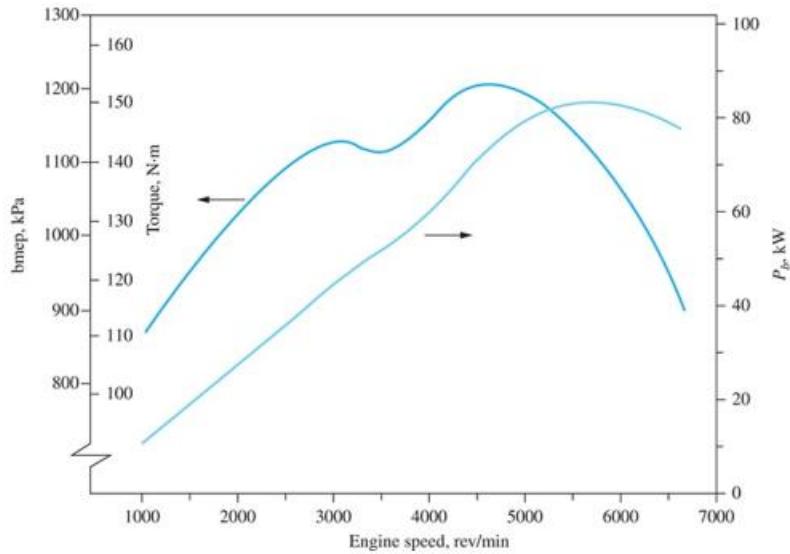


Figura 2.3.  $bmap$ , torque y potencia vs velocidad de operación([Heywood, 2018](#)).

**2.6.** El valor de  $mep$  (al igual que el torque) de un motor varía con la velocidad de operación, siguiendo de cerca la curva de rendimiento volumétrico como se puede ver en la figura 2.3.

En la actualidad, valores típicos de  $bmap$  de motores SI naturalmente aspirados rondan los 1050 a 1250 kPa para la velocidad a la que se alcanza el torque máximo.

#### 2.1.4 Rendimiento Volumétrico

El rendimiento volumétrico mide la eficiencia del sistema de admisión y se define como el cociente entre el caudal másico de aire que ingresa al sistema de admisión y la velocidad con la que este volumen es desplazado por el pistón. En otras palabras, este indicador mide la eficiencia con la que el motor bombea aire.

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{a,i}V_d N} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{a,i}V_d} \quad (2.7)$$

Para motores naturalmente aspirados, la densidad del aire de admisión  $\rho_{a,i}$  se toma comúnmente como la densidad atmosférica por lo que  $\eta_v$  mide el rendimiento de todo el sistema de admisión.

El valor de rendimiento volumétrico máximo para motores naturalmente aspirados ronda el 90%. Su valor se ve afectado por varios fenómenos dentro de los cuales los

más importantes son:

**Efectos cuasiestáticos** Combustible, relación aire/combustible, vaporización del combustible en el conducto de admisión, temperatura del aire de admisión, relación entre presión de admisión y escape, relación de compresión, etc.

**Pérdidas de carga por fricción viscosa** Las pérdidas viscosas aumentan con la velocidad de flujo y aumentan a medida que aumenta la velocidad de giro del motor.

**Pérdidas de carga localizada** Filtros, puertos, válvulas generan pérdidas localizadas, caídas de presión.

**Transferencia de calor en sistema de admisión** La mezcla se calienta por transferencia de calor y esto disminuye la densidad de la misma, reduciendo la masa disponible para la combustión.

**Reglaje de las válvulas/puertos** El punto de apertura y cierre de los puertos (reglaje) es clave para el funcionamiento del motor, dependiendo del reglaje que se elija, se puede favorecer el flujo a determinada velocidad de operación.

**Flujo bloqueado en puertos de admisión y escape** En las zonas de menor área de pasaje la velocidad del fluido puede aumentar hasta alcanzar la velocidad del sonido, esto se conoce como bloqueo y limita el caudal másico que puede ingresar a la cámara de combustión. Encuentra a mayor temperatura que la mezcla que ingresa, esto produce un aumento

**Sintonía del puerto de admisión y escape** El diseño de los puertos de admisión y escape puede favorecer el funcionamiento de los mismos a determinada velocidad de operación, esto se logra aprovechando las ondas de presión que se producen por la apertura y cierre de las válvulas.

**Sobrecarga** Por medio de un compresor o turbocompresor se puede aumentar presión en el sistema de admisión forzando más aire a la cámara de combustión.

**Efecto RAM** A grandes velocidades de flujo la inercia del gas produce un aumento de presión al momento del cierre del puerto de admisión y esto permite un mayor ingreso de masa fresca al cilindro.

La curva de rendimiento volumétrico es muy similar a la curva de torque o de presión media efectiva, la cantidad de aire que ingresa al motor está directamente relacionada con el de trabajo que se puede realizar por cada ciclo de operación. combustible a inyectar está limitada por la masa de aire fresca en la cámara de Este indicador es central en la evaluacion del desempeño de los sistemas de intercambio de gases y es el principal indicador utilizado en este trabajo y buscó que el software desarrollado devuelva un espectro de opciones de configuración de los puertos, de los cuales seleccionar la mejor geometría teniendo en cuente este y otros indicadores de rendimiento y parámetros operativos en general, como lo son el torque y la potencia entegada.  $\eta_v$  sin entrar en detalle de los efectos presentes.

En este trabajo se busco que la curva de rendimiento volumétrico de los motores simulados tenga un máximo para velocidades mayores a 6000 RPM para de aprovechar el balanceo mecánico del motor que permite funcionar y seguir entreganto potencia a altas RPM además, se la curva debe ser suave para todo el régimen de funcionamiento del motor. de funcionamiento del

revoluciones de modo de aprovechar el balanceo del motor para maximizar el trabajo RPM, a su vez relativamente Estos efectos se describen en detalle en la literatura([Heywood, 2018](#)), para este trabajo se tiene las siguientes consideraciones:

1. El combustible utilizado es isoctano, la mezcla aire-combustible es estequeométrica ( $\phi = 1$ ).
2. El sistema de intercambio de gases del MRCVC se compone de un conducto y puerto admisión, conducto y puerto de escape. El software ICESym tiene en cuenta pérdidas por fricción viscosa en los conductos y los puertos son los únicos elementos que generan pérdidas localizadas.
3. Los conductos se asumen como elementos rectos de un largo finito y diámetro constante, cuya fuente y sumidero es la atmósfera a  $101330.0\text{Pa}$  y  $25^\circ\text{C}$ .

4. La temperatura de la pared de la cámara de combustión se asume en 450K.
5. El motor es naturalmente aspirado.

### 2.1.5 Fracción de gases residuales

La fracción de gases residuales  $x_r$  mide la cantidad de gases quemados que hay en el cilindro al inicio de la carrera de admisión. Esto ocurre principalmente por dos razones, en primer lugar queda gas atrapado en el cilindro, remanente del ciclo anterior y en segundo lugar puede existir un reflujo desde el puerto de escape hacia la cámara de combustión si hay solape de válvulas, lo que afecta: rendimiento volumétrico, trabajo obtenido, eficiencia y emisiones.

En el MRCVC existe además solape de cámara, este es un fenómeno en el que una cámara en proceso de admitir gases frescos se ve afectada por la apertura del puerto de admisión a la cámara siguiente, que se encuentra a mayor presión y temperatura por estar culminando el proceso de escape y comenzando el de admisión, esto reduce el rendimiento volumétrico.

### 2.1.6 Coeficiente de descarga

La pérdida de carga localizada en los puertos de admisión y escape se puede medir con el coeficiente de descarga  $C_D$ , este indicador mide la eficiencia del escurrimiento y se obtiene experimentalmente o con simulaciones computacionales. El valor de  $C_D$  varía con la geometría y condiciones de operación del puerto, siendo  $C_D = 1$  el caso ideal sin pérdida de carga localizada.

El caudal másico que fluja o circula por los puertos se calcula a partir de las ecuaciones de flujo compresible a través de una restricción, para el caso en que el flujo no esté bloqueado la ecuación de  $\dot{m}$  es la 2.8 y en caso de que se cumpla la desigualdad 2.32 el flujo está bloqueado y se utiliza la ecuación 2.10.

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R p_0}{\sqrt{RT_0}} \left( \frac{p_T}{p_0} \right)^{1/\gamma} \left( \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_T}{p_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right] \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

$$\frac{p_T}{p_0} \leq \left[ \frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.9)$$

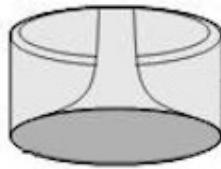


Figura 2.4. Área de cortina

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R p_0}{(RT_0)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left( \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(2(\gamma-1))} \quad (2.10)$$

Dónde:

- $p_0$ , es la presión de estancamiento antes de la restricción.
- $T_0$ , es la temperatura de estancamiento antes de la restricción.
- $p_T$ , es la presión estática justo después de la restricción.
- $A_R$ , es el área de pasaje de flujo o de referencia.
- $\dot{m}$ , es el caudal másico.
- $\gamma$ , es el cociente de capacidades térmicas del gas.

Presiones y temperaturas se pueden medir u obtener de una simulación computacional del ciclo del motor. La elección del área de referencia utilizada para el cálculo es arbitraria, sin embargo se suele utilizar el área de cortina, que se calcula como con el producto del diámetro  $D_v$  y alzada de válvula  $l_v$ .

$$A_R = A_C = \pi D_v l_v \quad (2.11)$$

combustión interna el sistema de intercambio de gases se aire, filtro de aire, cuerpo de mariposa, puerto de escape se tiene un puerto de escape, catalizador y silenciador descargar en la atmósfera. este trabajo es utilizó un conducto de admisión y escape

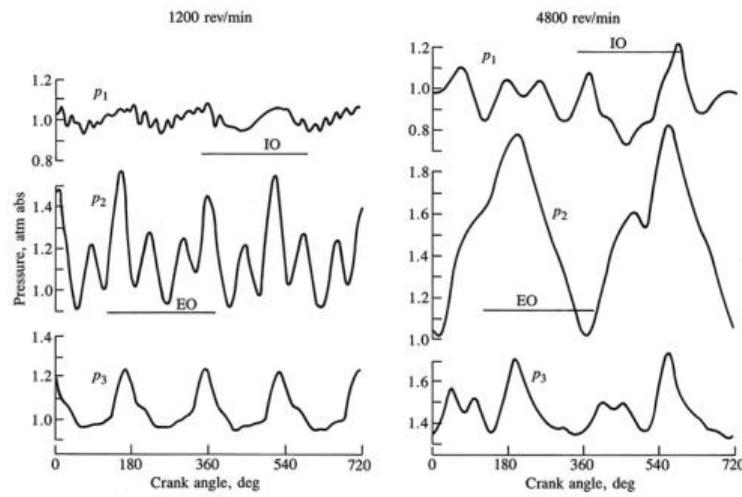


Figura 2.5. (cambiar por una del mrcvc) Diagrama de presión vs ángulo de cigüeñal

### 2.1.7 Sincronización del sistema de admisión

volúmenes se encuentran a diferente presión que tiende que tiende a En motores naturalmente aspirados, al momento de abrir la válvula o puerto de admisión, los gases residuales en la cámara se encuentran a una presión mayor que la masa fresca en el puerto de admisión, esta diferencia de presión produce una onda de depresión que viaja desde la cámara de combustión hacia el extremo opuesto del conducto de admisión. Cuando esta onda de presión llega al plenum de admisión, se refleja como una onda de sobrepresión que toma un tiempo  $t$  en alcanzar nuevamente el puerto, si el tiempo que toma la onda en reflejarse es tal que alcanza la válvula justo antes del cierre de la misma se dice que el puerto el sistema está sintonizado. Esta sobrepresión permite que ingrese una mayor cantidad de masa fresca a la cámara de combustión, aumentando la cantidad de trabajo que se puede realizar.

En la figura 2.5 se muestra el diagrama de presión vs ángulo de cigüeñal para 1200 y 4800 RPM, en donde se indican los períodos en los que se encuentran abiertos las válvulas de admisión (IO) y de escape (EO). Los valores  $p_1$ ,  $p_2$  y  $p_3$  hacen referencia diferentes longitudes de los conductos de admisión y escape. Se puede ver que para  $p_1$  a 4800 RPM hay un claro pico de presión justo al cierre del puerto de admisión, con esto el puerto está sintonizado para esta velocidad.

Debido a que la onda de presión debe viajar dos veces longitud del conducto

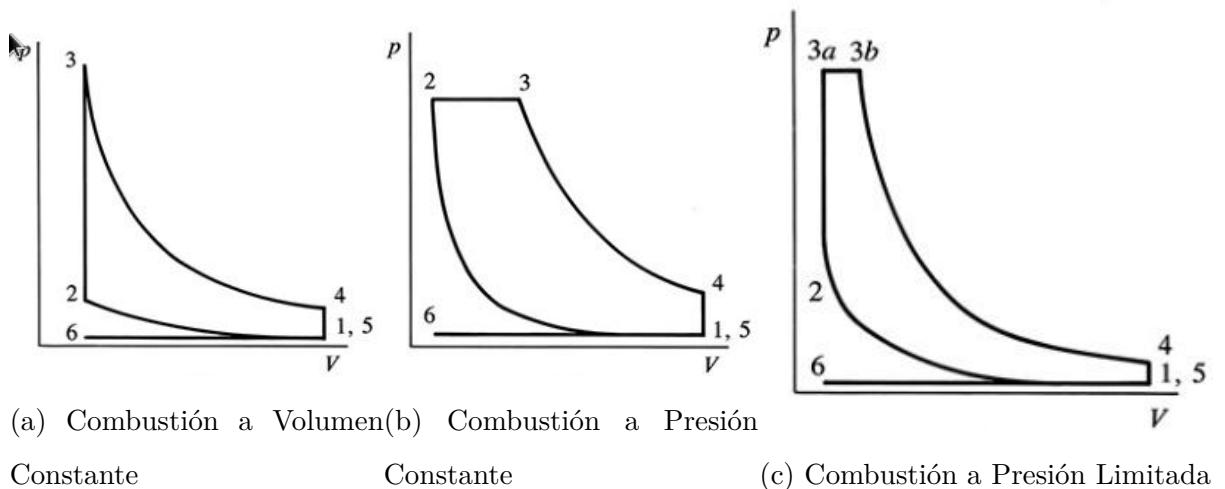
de admisión desde el momento que abre el puerto de admisión, para sincronizar el sistema de admisión a bajas velocidades, se requieren longitudes mayores lo que hace más grande el sistema de admisión. La sincronía a mayores velocidades de admisión es preferida, porque usualmente se tiene el máximo de torque y de potencia a mayores RPM, además reduce la necesidad de conductos más largos. En motores multi cilíndricos se utiliza un plenum de admisión, este dispositivo proporciona un volumen grande de aire que se utiliza como resonador. Se puede hacer vibrar de modo que las oscilaciones de presión internas envían ondas de sobre presión a cada puerto en el momento preciso en el que se aproxima el cierre del mismo.

### 2.1.8 Sincronización del sistema de escape

De forma análoga al puerto de admisión, al momento de la apertura del puerto o válvula de escape los gases residuales de la combustión se encuentran a una mayor presión que el gas en el conducto, esto crea una onda de sobrepresión que viaja por el escape hasta alcanzar el final del mismo o un área de gran volumen, como el catalizador o el silenciador. Desde esta zona se refleja como una onda de depresión, que si alcanza el puerto justo antes del cierre del mismo ayuda a evacuar una mayor cantidad de gas, disminuyendo la cantidad de gases residuales presentes para el próximo ciclo.

Reducir la cantidad de gases residuales tiene dos efectos beneficiosos, en primer lugar estos gases ocupan volumen en la cámara de combustión, además porque su elevada temperatura (en relación a la masa fresca) calienta el gas que ingresa al cilindro desde el puerto de admisión, aumentando el volumen específico y reduciendo el rendimiento volumétrico.

En la figura 2.5 se ve que para el escape en  $p_2$  se tiene una depresión justo al cierre del puerto, este sistema está sintonizado para 4800 RPM, es notorio el contraste con el mismo puerto a 1200 RPM, en donde se ve un pico de presión cerca del cierre del puerto.

Figura 2.6. Diagramas P-V para ciclos ideales([Heywood, 2018](#))

### 2.1.9 Combustión

La combustión es un proceso en el que se libera la energía química del combustible, la geometría de un motor de combustión interna permite aprovechar el aumento de presión y temperatura que ocurre en la cámara durante este proceso para convertir esta energía en trabajo mecánico. Los modelos ideales de ciclos operativos se pueden clasificar según el proceso de combustión en:

1. volumen constante
2. presión constante
3. presión limitada (parte a volumen constante y parte a presión constante)

En un motor de encendido por chispa se tiene una mezcla de aire-combustible en la cámara de combustión, dependiendo del tipo de motor la mezcla se puede formar en el conducto de admisión, inyectando combustible en algún punto del sistema ó se puede producir la mezcla en la cámara por la inyección directa de combustible. En un motor de encendido por compresión, la mezcla combustible se forma en la cámara de combustión, luego de la inyección directa del combustible.

El MRCVC es un motor de combustión interna encendido por chispa en el que, gracias al a geometría del mismo gran parte de la combustión ocurre a volumen constante, esto se puede apreciar en la figura ??, la cual es una

gráfica de volumen obtenida de una de las simulaciones del MRCVC con ICESym. En este trabajo no se estudia el proceso de combustión del MRCVC, sin embargo se describe el motivo por el que la combustión a volumen constante es una característica atractiva de este motor. presión constante.

En (Heywood, 2018) se hace un análisis de los modelos operativos de gas ideal, en los cuales se asume que volumen constante se puede ver operativos (Heywood, 2018), el fluido de trabajo es gas ideal, con  $C_v$  y  $C_p$  constantes. Se pueden analizar los 3 casos de combustión: volumen constante, presión constante o presión limitada, obteniendo expresiones para el rendimiento de conversión de combustible 2.12 y de  $imep$  en función de la presión mínima del ciclo  $p_1$  2.15 y máxima  $p_3$  2.16. Tanto la combustión a volumen constante como el caso a presión constante son casos extremos de la combustión a presión limitada, por lo que se puede utilizar el rendimiento de conversión de combustible para el ciclo de presión limitada es para comparar entre ambos.

$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \left[ \frac{\alpha\beta^\gamma - 1}{\alpha\gamma(\beta - 1) + \alpha - 1} \right] \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{P_3}{P_2} \quad (2.13)$$

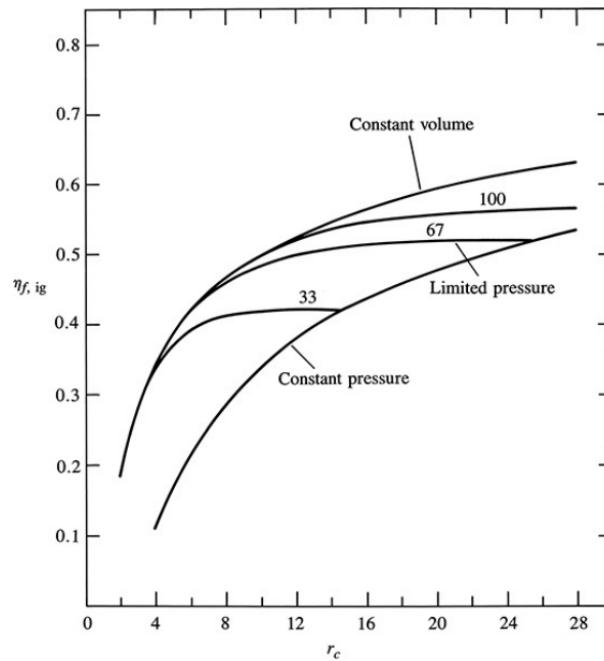
$$\beta = \frac{V_{3b}}{V_{3a}} \quad (2.14)$$

$$\frac{imep}{p_1} = \frac{Q^*}{c_v T_1 (\gamma - 1)} \left( \frac{r_c}{r_c - 1} \right) \eta_{f,i} \quad (2.15)$$

$$\frac{imep}{p_3} = \frac{1}{\alpha r_c^\gamma} \left( \frac{Q^*}{c_v T_1} \right) \left( \frac{1}{\gamma - 1} \right) \left( \frac{r_c}{r_c - 1} \right) \eta_{f,i} \quad (2.16)$$

En el caso en que  $\alpha = 1 \rightarrow P_3 = P_2$  y se tiene el ciclo de combustión a presión constante, en el caso en que  $\beta = 1 \rightarrow V_{3a} = V_{3b}$  y se tiene el ciclo de combustión a volumen constante, como se ve en la figura 2.6.

Graficando la ecuación 2.12 en función de la relación de compresión  $r_c$  (figura 2.7), para distintos valores se ve que a igual relación de compresión, el ciclo a volumen constante presenta mayor rendimiento de conversión de combustible.



**Figure 5.7** Fuel conversion efficiency as a function of compression ratio, for constant-volume, constant-pressure, and limited-pressure ideal gas cycles.  $\gamma = 1.3$ ,  $Q^*/(c_v T_1) = 9.3(r_c - 1)/r_c$ . For limited-pressure cycle,  $p_3/p_1 = 33, 67, 100$ .

Figura 2.7. Rendimiento de conversión de combustible en función de  $r_c$  para ciclos de gas ideal de volumen constante, presión constante y presión limitada(cambiar por propia??)

Del mismo modo, graficando la relación entre la presión media efectiva indicada y la presión máxima del ciclo,  $imep/p_3$ , se ve que a igual relación de compresión el ciclo de combustión a presión constante presenta mayores valores de  $imep$  en relación a la presión máxima, esto tiene que ver con las altas presión alcanzadas en el ciclo ideal de combustión a volumen constante. La presión máxima que se puede alcanzar en el ciclo real tiene limitaciones relacionadas a mayores pérdidas de masa (y presión) a través de sellos y la resistencia mecánica de los componentes del motor además, mayores presiones están asociadas con mayores temperaturas en la cámara de combustión.

### 2.1.10 Propiedades termodinámicas de mezclas aire-combustible

La combustión de una mezclas de aire-combustible es la fuente de energía del motor, se debe poder calcular con cierto grado de certeza las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo a lo largo del ciclo de operación. En lo pertinente a este trabajo, el simulador ICESym contiene rutinas computacionales para calcular el estado del fluido de trabajo en el ciclo operativo del motor el por lo que este aspecto esta cubierto, sin embargo fue necesario estimar las propiedades termodinámicas de la mezcla para obtener algunas variables utilizadas para calcular las condiciones iniciales del gas en las flujometrías.

Hay extensa literatura sobre el tema por lo que en este apartado simplemente se detallan las hipótesis y modelos utilizados en las rutinas computacionales.

En la simulación del MRCVC se utilizó una mezcla estequeométrica de aire-isoctano  $C_8H_{18}$  cuya reacción estequeométrica se indica en la ecuación 2.17, este combustible es normalmente usado en investigación de motores de combustión interna es el combustible de referencia utilizado para determinarl el octanaje de un motor.



Expresando el combustible de manera genérica com  $C_aH_b$  o en función de la cantidad de moles de carbono del combustible  $CH_y$ , se puede expresar la proporción estequeométrica de aire combustible que se requieren como se ve en la ecuación 2.18

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \left(\frac{F}{A}\right)^{-1}_s = \frac{34.56(4+y)}{12.011 + 1.008y} \quad (2.18)$$

Otro número importante es la relación de equivalencia que se calcula con el cociente entre la relacion molar real y estequeométrica de una mezcla, ver ecuación 2.19

$$\phi = \frac{(F/A)_{real}}{(F/A)_s} \quad (2.19)$$

Para calcular las propiedades teromdinámicas de las mezclas aire-combustible se utilizaron rutinas computacionales que aproximan las mismas con curvas polinómicas

asumiendo que: 1) la composición de la mezcla sin quemar está, congelada 2) la mezcla de gases quemados se encuentra en equilibrio químico.

La composición de la mezcla no cambia significativamente durante los procesos de admisión y compresión, por lo que se asume que la mezcla está congelada. Durante la combustión y parte del proceso de expansión se asume que la mezcla de gases quemados está cerca del equilibrio termodinámico, a medida que los gases se enfrián en durante la expansión, se puede asumir que la composición química se congela.

Para cada compuesto  $i$  a temperatura estándar  $T(K)$  y 1 atmósfera de presión se aproxima el calor específico a presión constante  $\tilde{c}_{p,i}$  por la ecuación 2.20, la entalpía estándar  $\tilde{h}_i$  por la ecuación 2.21 y la entropía estándar  $\tilde{s}_i$  por la ecuación 2.22.

$$\frac{\tilde{c}_{p,i}}{T} = a_{i1} + a_{i2}T + a_{i3}T^2 + a_{i4}T^3 + a_{i5}T^4 \quad (2.20)$$

$$\frac{\tilde{h}_i}{RT} = a_{i1} + \frac{a_{i2}}{2}T + \frac{a_{i3}}{3}T^2 + \frac{a_{i4}}{4}T^3 + \frac{a_{i5}}{5}T^4 + \frac{a_{i6}}{T} \quad (2.21)$$

$$\frac{\tilde{s}_i}{R} = a_{i1} \ln T + a_{i2}T + \frac{a_{i3}}{2}T^2 + \frac{a_{i4}}{3}T^3 + \frac{a_{i5}}{4}T^4 + a_{i6} \quad (2.22)$$

La base de datos seleccionada para los datos del aire y productos de la combustión es Chemkin (Kee, 1991) y los datos del isoctano de Raine (Raine, 2000).

La finalidad de estas rutinas (por fuera de las incluidas en ICESym) es la de obtener la masa molar de la mezcla  $M_M$ , la viscosidad dinámica, calor específico a presión constante  $C_P$ , gamma  $\gamma$  y el número de Prandtl  $P_R$ , utilizados para algunos valores iniciales de las flujometrias.

La masa molar de la mezcla  $M_M$  se calcula a partir de la suma de las masas molares  $M_i$  y la fracción molar de cada especie química presente en la mezcla  $x_i$ , ver ecuación 2.23. La viscosidad dinámica  $\mu$  de productos de la combustión de mezclas de aire-combustible se aproxima a partir de la relación de equivalencia de la mezcla  $\phi$  y la temperatura  $T$  en Kelvins, ver

La viscosidad  $\mu$  de los productos de la combustión de aire e hidrocarburos para temperaturas de entre  $T \in [500, 4000]K$ ,  $P \in [1, 100]atm$  y  $\phi \in [0, 4]$  se puede aproximar en función de la temperatura y la relación de equivalencia con la ecuación 2.24.

Del mismo modo, el número de Prantl de productos de la combustión de hidrocarburos y aire se puede estimar en función del  $\gamma$  de la mezcla, para  $\phi \leq 1$  con la ecuación 2.25

$$Mm = \sum_i M_i x_i \quad (2.23)$$

$$\mu_{productos} = \frac{\mu_{aire}}{1 + 0.027\phi} = \frac{3.3 \times 10^{-7} T^{0.7}}{1 + 0.027\phi} \quad (2.24)$$

$$Pr = 0.05 + 4.2(\gamma - 1) - 6.7(\gamma - 1)^2 \quad (2.25)$$

## 2.2 Geometría y Ciclo Operativo del MRCVC

En este apartado se describen algunos de los aspectos geométricos del motor y ciclo operativo del MRCVC.

Los componentes principales del motor son: rotor, estator, paletas, bieletas, rueda paralelizadora, eje de motor, conducto de admisión y conducto de escape; el motor analizado en este trabajo tiene 3 paletas con ápices agudos, que corresponden a la geometría ideal del motor (con ápices de paletas de radio nulo). La forma de estos elementos se puede ver en la figura 1.1 y en la tabla 2.1 se resume el valor de los parámetros geométricos que utilizados en este trabajo.

Uno de los aspectos más importantes de este motor es la geometría de la cámara de combustión, su forma es tal que el volumen mínimo del ciclo permanece constante por un período angular considerable, determinado por la geometría del motor. Este período es lo suficientemente grande para permitir que la combustión se realice casi en su totalidad a volumen constante.

La combustión a volumen constante brinda una mejora en el rendimiento energético del motor además, el balanceo de fuerzas que se obtiene por ser un motor rotativo permite operar el motor a altas RPM y así alcanzar mayores potencias que motores de tamaño o cilindrada similar. Esta combinación de un rendimiento y potencia que, en principio pueden ser altos en comparación a motores cilindrada similar, hace atractivo el desarrollo de este motor. En la figura 2.8 se presenta el diagrama  $P - V$  de una simulación de ICESym del MRCVC.

El ciclo operativo del MRCVC es un ciclo Otto en el que las carreras de admisión, compresión, expansión y escape ocurren a medida que el fluido de trabajo rota con respecto al eje del cigüeñal. En la figura 2.9 se puede ver una progresiva del ciclo del MRCVC con estas carreras representadas en azul para la admisión, compresión en amarillo, la expansión en rojo y escape o barrido en violeta.

Durante el ciclo se destaca un aspecto particular de este motor, siguiendo la paleta de color negro se ve que durante el proceso de compresión y combustión, las paletas que forman la frontera aguas arriba y aguas abajo de la cámara de combustión cambian. La paleta que delimitaba el frente de la cámara se retrasa con respecto a

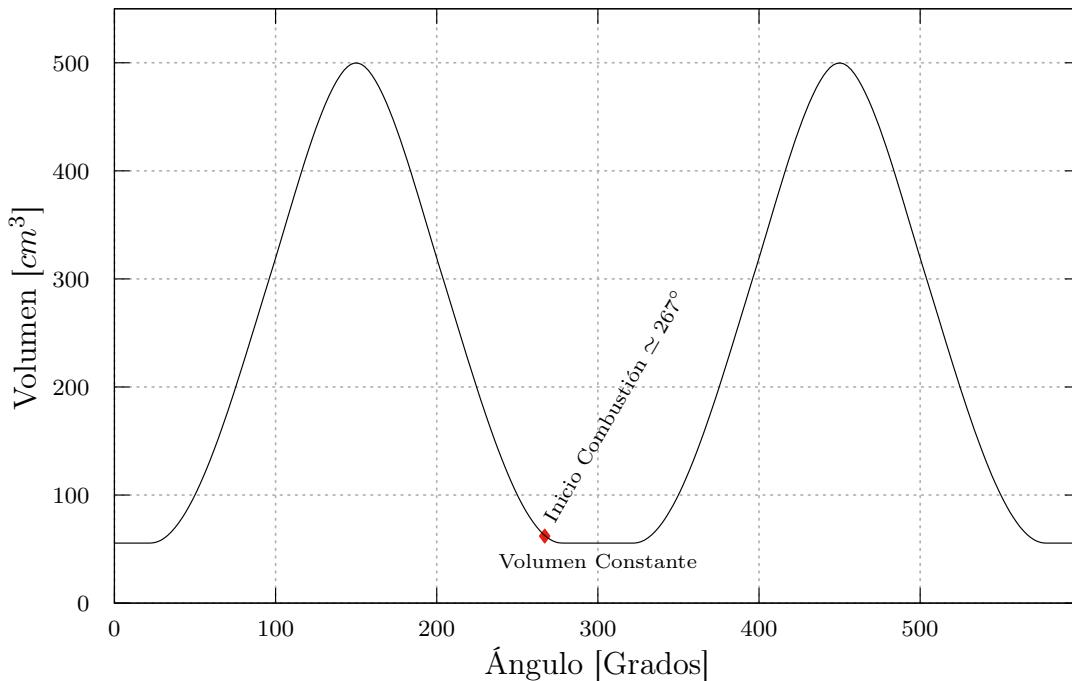


Figura 2.8. Diagrama P-V del MRCVC

Parámetro	n	R	r	$h_c$	rc	V0	$R_i$	$R_e$
Valor	3	116.1	44.1	44.1	9	500	107.4	139.0
Unidades	—	mm	mm	mm	—	cm³	mm	mm

Tabla 2.1. Geometría del MRCVC

la cámara con la que inició el ciclo, produciendo que este dure más de 1 revolución resultando en aproximadamente 600°.

Para un motor de  $R = 116.1$  mm y  $r = 44.1$  mm el volumen mínimo alcanzado permanece constante por un período de 44.65°, como se puede ver en la figura ?? en donde se esquematiza la variación del volumen con respecto al ciclo.

### 2.2.1 Sistemas de intercambio de gases

En un motor típico de combustión interna el sistema de intercambio de gases se compone de una toma de aire, filtro de aire, cuerpo de mariposa, puerto de admisión, puerto y conducto de escape, catalizador y silenciador hasta finalmente descargar

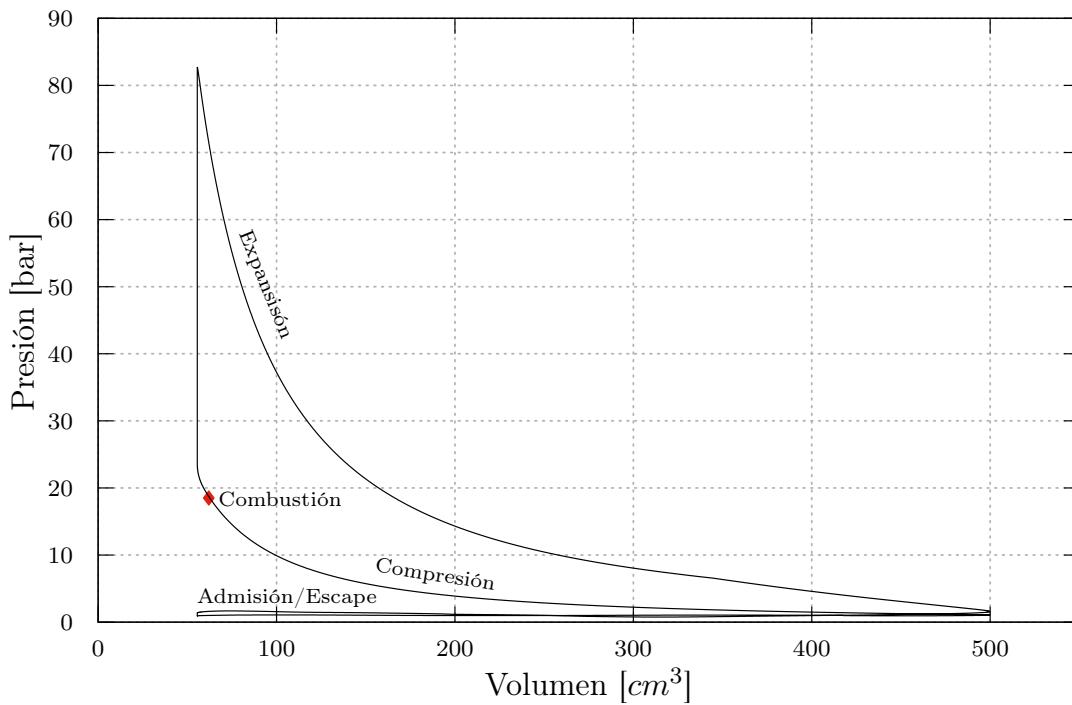


Figura 2.9. Ciclo operativo del MRCVC

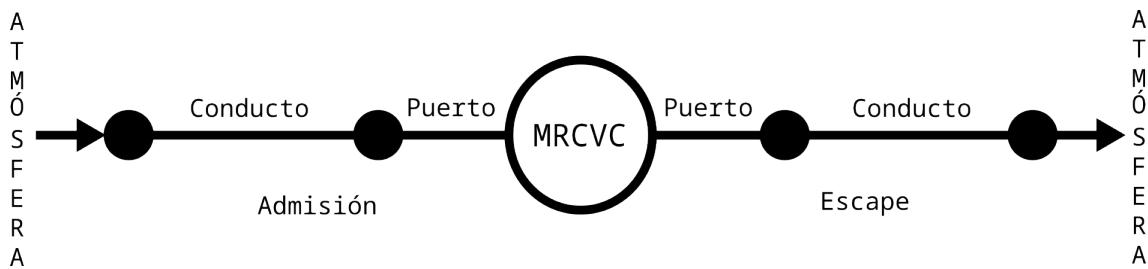


Figura 2.10. Esquema del sistema de intercambio de gases

en la atmósfera.

Para simplificar el sistema analizado, no se tuvieron en cuenta elementos como: mariposa, carburador, filtros de aire, convertidores catalíticos y demás; sino que se utilizó un sistema simplificado en el que solamente se tiene conducto de admisión y escape junto con puertos de admisión y escape. El eje de los conductos coincide con el eje del puerto, estos últimos hacen una transición desde el diámetro del conducto hasta la altura de la ranura del puerto en la cámara de combustión, en la figura 2.10 se esquematiza la geometría mencionada.

En trabajos anteriores (López, Cañón y Nigro, 2013) se demostró que se tiene una mejor *performance* del motor si se ubican los puertos en el cuerpo central del

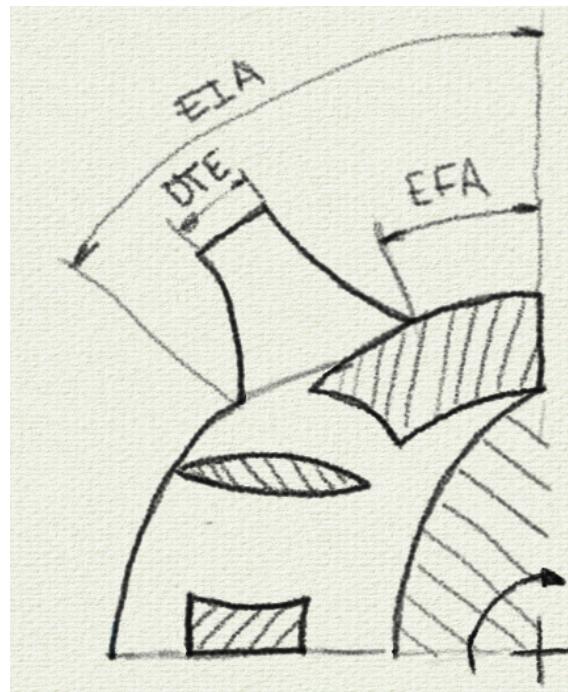


Figura 2.11. Puerto de escape

estator. En dicho trabajo se realizó una optimización de la geometría mediante un barrido paramétrico de las variables que determinan la forma, posición y reglaje de los puertos, ya que es la ubicación angular de los puertos la que determina la duración de los procesos de admisión y escape. Los puertos de admisión y escape están fijos en la periferia del estator y su posición se indica con los ángulos *IIA*, *EIA* para la admisión y *EIA* y *EFA* para el escape. En la figura 2.11 se indican estos para el puerto de escape.

## 2.3 Flujometrías y CFD

Para obtener una mejor caracterización del funcionamiento de los puertos de admisión y escape es necesario tener mayor conocimiento del coeficiente de descarga  $C_D$  en diferentes condiciones operativas de los mismos. Esto se logró realizando una serie de flujometrías para obtener valores de  $C_D$  en función de la diferencia de presión que *ve* el puerto y la apertura del mismo<sup>4</sup>, con el fin de obtener un mapa en función de la presión y la alzada  $C_D = f(\Delta P, l_v)$ .

El simulador ICESym requiere de información sobre el coeficiente de descarga para calcular el área efectiva de pasaje de flujo de las válvulas (o puertos en el caso del MRCVC), introduciendo el mapa de coeficientes se tiene una mejor aproximación al funcionamiento del sistema de intercambio de gases porque se tiene un modelado de la eficiencia del sistema para distintos regímenes del motor.

### 2.3.1 Modelos de turbulencia

El flujo a través del puerto es de carácter transitorio, turbulento. Para modelar este tipo de flujo se utilizó el modelo de dos ecuaciones  $\kappa - \epsilon$  (Wilcox, 2006), que brinda una ecuación para la *energía cinética turbulenta*  $\kappa$  y otra para la *velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta*  $\epsilon$ . El modelo está basado en el modelo estándar  $\kappa - \epsilon$  (Launder, 1974), es uno de los más populares con *performance* conocida y las ecuaciones del modelo son

$$\frac{D}{Dt}(\rho\kappa) = \nabla \cdot (\rho D_\kappa \nabla \kappa) + P - \rho\epsilon \quad (2.26)$$

Dónde:  $\kappa$  es la energía cinética turbulenta en  $m^2 s^{-2}$   $D_\kappa$  es la difusividad efectiva para  $\kappa$   $P$  es la velocidad de producción de energía cinética turbulenta en  $m^2 s^{-3}$   $\epsilon$  es la velocidad de disipación de energía cinética turbulenta en  $m^2 s^{-3}$

$$\frac{D}{Dt}(\rho\epsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) \frac{C_1 \epsilon}{\kappa} \left( P + C_3 \frac{2}{3} \kappa \nabla \cdot u \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (2.27)$$

---

<sup>4</sup>ICESym utiliza alzada, por lo que se traduce área de pasaje de puerto en alzada de válvula equivalente.

Dónde: 1)  $D_\epsilon$  es la difusividad efectiva de  $\epsilon$ , 2)  $C_1$  es un coeficiente del modelo, 3)  $C_2$  es un coeficiente del modelo.

La ecuación para la viscosidad turbulenta  $\nu_t$  es

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (2.28)$$

Dónde: 1)  $C_{mu}$  es un coeficiente del modelo, 2)  $\nu_t$  es la viscosidad turbulente en  $m^2 s^{-1}$ .

Los coeficientes por defecto del modelo son

$$C_{\epsilon 1} = 1.44 \quad C_{\epsilon 2} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (2.29)$$

El valor inicial para  $\kappa$  se puede estimar con:

$$\kappa = \frac{3}{2} (|u_{ref}| \cdot I)^2 \quad (2.30)$$

Dónde: 1)  $I$  es la intensidad de turbulencia en %, 2)  $u_{ref}$  es una velocidad de referencia en  $ms^{-1}$ .

El valor inicial para  $\epsilon$  se puede estimar con:

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot \kappa^{3/2}}{l_m} \quad (2.31)$$

Dónde: 1)  $C_\mu$  es una constante del modelo que valo 0.09 por defecto, 2)  $l_m$  es una longitud de referencia, para flujos internos se estima con el diámetro hidráulico de la cañería,  $0.07 \cdot D_m$ .

Las ecuaciones anteriores de  $\kappa$  y  $\epsilon$  son estimaciones para dar un valor inicial al problema. La longitud de mezcla  $l_m$  determina el tamaño que pueden tener los *eddys* turbulentos, su valor inicial se approximó como la altura de cámara  $l_m = h_c$ .

### 2.3.2 Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales se determinan para cada punto de interés a partir de los datos obtenidos del simulador ICESym. Se tienen dos casos distintivos al momento de modelar el flujo a través de los puertos, flujo compresible e incompresible. Para este último se considera que los efectos de la compresibilidad del gas se pueden despreciar cuando el número de Mach es menor a 0.3–0.4. Además, se deben separar

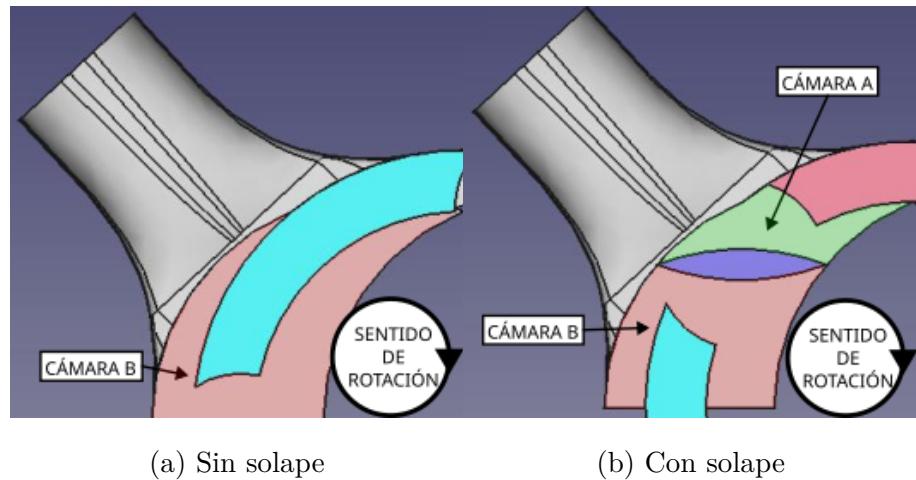


Figura 2.12. Solape de cámaras

los casos a modelar entre aquellos en los que hay solape de cámaras y los que no (ver figura 2.12), en estos casos se define también un valor medio para inicializar el interior del dominio que representa el gas dentro de la cámara de combustión.

Independientemente del tipo de flujo que se esté simulando, de ICESym se toman los valores de presión, temperatura, densidad y velocidad para calcular los valores iniciales.

Debido a la cantidad de flujometrías a realizar, se utilizó un script para leer los datos de salida de ICESym y calcular los valores requeridos en función del tipo de flujo a simular.

Este script toma el estado del gas del simulador tanto en la cámara de combustión como del puerto que se esté analizando, para la posición de alzada y RPM requeridas. Con estos valores se calculan las propiedades termodinámicas del gas con las siguientes relaciones para cada cámara analizada, los valores leídos son:

- $\rho_{c,i}$ , Es la densidad del gas en la cámara de combustión  $i$ .
- $P_{c,i}$ , Es la presión del gas en la cámara de combustión  $i$ .
- $T_{c,i}$ , Es la tempratura del gas en la cámara de combustión  $i$ .
- $\rho_{p,i}$ , Es la densidad del puerto  $i$ .
- $v_{p,i}$ , Es la velocidad del gas en el puerto  $i$ .

- $P_{p,i}$ , Es la presión del gas en el puerto  $i$ .

A partir de esta información también se calculan los valores medios, en caso de haber solape de cámaras para el caso analizado, se utiliza el valor medio para calcular los valores iniciales del caso.

Con estos valores iniciales se pueden calcular o estimar las propiedades termodinámicas de la mezcla de gases frescos o quemados, dependiendo si se está evaluando un puerto de admisión o escape:

- $M_M$ , Masa molar, ec.[2.23](#)
- $C_p$ , Calor específico a presión constante.
- $\gamma$ , Relación  $C_p/C_v$  del gas
- $\mu$ , Viscosidad dinámica, ec.[2.24](#)
- $\nu$ , Viscosidad cinemática
- $P_R$ , Número de Prandtl, ec.[2.25](#)
- $k_{est}$ , Energía cinética turbulenta, ec.[2.30](#)
- $\epsilon_{est}$ , Disipación de la energía cinética turbulenta, ec.[2.31](#)

Para simplificar el análisis no se tuvo en cuenta la fracción de gases residuales, el gas “flujado” es siempre aire limpio o el gas quemado de una mezcla estequeométrica de aire-combustible, siendo isoctano  $C_8H_{18}$  el combustible seleccionado.

Se utilizaron rutinas computacionales para modelar las propiedades termodinámicas de las mezclas aire-combustible, descritas brevemente en secciones anteriores, ver sección [2.1.10](#).

### 2.3.3 Malla

La malla se construyó a partir del modelo de CAD generado con los resultados obtenidos de las simulaciones del motor.

La implementación de las diferentes herramientas requeridas para generar una malla apta para realizar las flujometrías se describe en el apartado ??

El grado de refinamiento de la misma se determinó luego de realizar una serie de flujometrías con tamaños decrecientes de celda y viendo la variabilidad de los resultados. El objetivo de las flujometrías es obtener el flujo másico  $\dot{m}$  del puerto para un estado del gas dado, se redujo el tamaño inicial de celda hasta que el valor de  $\dot{m}$  no se modificó en más de un 5% del valor anterior, con un nivel de refinamiento mayor. En algunos casos se utilizaron mallas más gruesas para obtener un valor inicial de una malla de mayor refinamiento. Por ejemplo, con una malla inicial de cubos de 15mm de lado se obtiene una solución que se usa como valor inicial para una malla de 10mm y finalmente se realiza la simulación con la malla de 5mm para obtener el valor final del flujo másico.

### 2.3.4 Coeficiente de descarga $C_D$

El flujo másico que fluja el puerto se calcula a partir de las ecuaciones de flujo compresible a través de una restricción, habiendo dos casos distintivos: flujo bloqueado y no bloqueado.

El flujo está bloqueado si la velocidad en la garganta de la restricción alcanza la velocidad sónica, dada esta condición el flujo másico alcanza un límite y reducir la presión aguas abajo de la restricción no produce un aumento del caudal. La condición de flujo bloqueado se puede expresar en términos de la relación de presiones aguas arriba  $p_0$  y aguas abajo de la restricción  $p_T$ . Si se cumple la inecuación 2.32, el flujo está bloqueado.

El caudal másico para la condición de no bloqueado se calcula con la ecuación 2.33 y la ecuación 2.34 en caso de que el flujo esté bloqueado. Los parámetros involucrados en estas ecuaciones son:

- $p_0$ , es la presión de estancamiento antes de la restricción.
- $T_0$ , es la temperatura de estancamiento antes de la restricción.
- $p_T$ , es la presión estática justo después de la restricción.
- $A_R$ , es el área de referencia.
- $\dot{m}$ , es el caudal másico.

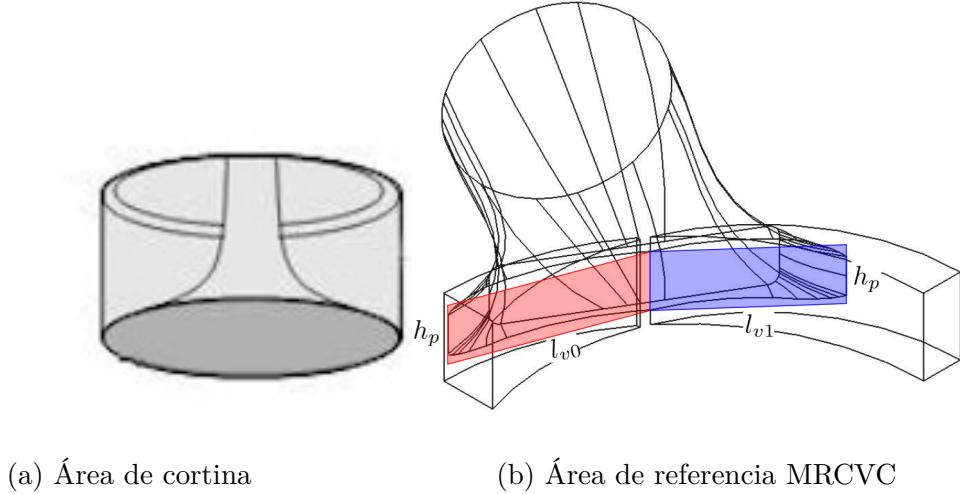


Figura 2.13. Área de referencia

- $\gamma$ , es el cociente de capacidades térmicas del gas.

$$\frac{p_T}{p_0} \leq \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.32)$$

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R p_0}{\sqrt{RT_0}} \left( \frac{p_T}{p_0} \right)^{1/\gamma} \left( \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_T}{p_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right] \right)^{1/2} \quad (2.33)$$

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R p_0}{(RT_0)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left( \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(2(\gamma-1))} \quad (2.34)$$

Un parámetro importante en las ecuaciones anteriores es el área de referencia  $A_R$  porque define el área utilizada para calcular el caudal másico que circula por el puerto, en un motor con válvulas se suele tomar el área de cortina como valor de referencia que se define como el producto de la circunferencia de la válvula ( $\pi D_v \cdot h_v$ ) con la alzada, ver figura 2.13(a). El área de referencia utilizada en ICESym es el área frontal del puerto expuesta a la cámara que se esté analizando, calculada como  $A_R = h_p \cdot l_v$ , ver figura 2.13(b).

Los valores de densidad, velocidad, presión y temperatura se obtienen de los datos de salida de ICESym para un puerto, ángulo y velocidad dada. Para la temperatura se utiliza la temperatura de cámara,  $T_0 = T_C$ , la presión antes y después del puerto se selecciona de acuerdo al sentido de flujo, en caso de ser flujo hacia la cámara

de combustión, la presión en el puerto se utiliza como inicial  $P_0$  y la presión en la cámara es la aproximación a la presión en la restricción  $P_T$ .

El valor de  $\gamma$  se obtiene de las propiedades de la mezcla con las rutinas computacionales descritas en el apartado [2.1.10](#).

De las flujometrías se obtiene el caudal mísico que fluja el puerto, con este dato y las ecuaciones anteriores se puede determinar el valor de  $C_D$ .

### 3. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

#### 3.1 Internal Combustion Engine Simulator

ICESym es un simulador de motores de combustión interna que utiliza modelos 0D para la cámara de combustión y 1D para el flujo a través del sistema de intercambio de gases. Permite evaluar la *performance* de un motor a un costo computacional bajo además, la implementación de entrada y salida de datos permite utilizar el simulador como una *caja negra* de modo que se pudo implementar en un *script* como una función a la que se le otorga un conjunto de parámetros de entrada y devuelve los resultados de la simulación en un formato que permite la lectura y evaluación de los mismos. Contiene en su código las rutinas necesarias para simular el ciclo operativo y la geometría del MRCVC.

Se realizaron modificaciones menores al simulador para facilitar la ejecución en conjunto con el optimizador, algunas de estas modificaciones fueron:

1. Modificar los archivos de salida, eliminando valores que no se utilizaron, de modo de reducir el tamaño de los archivos de salida, facilitar la lectura y el procesamiento de datos.
2. Incluir una opción para elegir entre un modelo de  $C_D$  de una o dos variables.
3. Modificar el área de referencia.
4. Agregar una interpolación bilineal para poder trabajar con el mapa de  $C_D$ .

#### 3.2 Modificaciones a ICESym

##### 3.2.1 Flujo a través de los puertos

Para tener un mejor modelado del flujo de gas a través de los puertos de admisión y escape, se introdujo una opción para poder ejecutar ICESym con un modelo del coeficiente de descarga que dependa de dos variables, diferencia de presión y *alzada* o apertura del puerto  $C_D = f(\Delta P; lv)$ . Esto significó agregar una opción que permita

seleccionar entre un  $C_D$  que depende únicamente de una o dos variables.

Con esto se construye una mapa del coeficiente de descarga de la forma  $C_D = f(l_v, dp)$ , que se utiliza para calcular el área efectiva de la válvula.

Independientemente de la cantidad de variables que formen parte del  $C_D$ , a ICESym se introduce un vector o matriz para el caso 1D o 2D respectivamente. En ambos casos se intrudce una cantidad discreta de valores por lo que es necesario realizar una interpolación lineal o bilineal para utilizar el valor de  $C_D$  correspondiente a un valor de  $l_v$  o par  $(l_v, \Delta_P)$ . La interpolación lineal 1D es parte del código de ICESym, la interpolación 2D o bilineal se introdujo como parte de este trabajo.

Esta última se realiza sobre una malla rectangular, de modo de reutilizar el código existente de para el caso 1D y realizar simplemente una interpolación lineal entre dos valores en planos con datos conocidos.

En la rutina de Fortran que sigue, se describe la interpolación 1D comentada del código de ICESym, para el caso en 2D se reutiliza esta rutina para interpolar entre los planos correspondientes a los valores requeridos.

```

1 SUBROUTINE interpolant(x, y, xi, yi)
2 ! x: vector con valores conocidos de x ordenados de menor a mayor y=f(x)
3 ! xi: valor de x para el que se quiere conocer yi=f(xi)
4 IMPLICIT NONE
5 REAL*8, INTENT(in) :: xi
6 REAL*8, DIMENSION(:), INTENT(in) :: x, y
7 REAL*8, INTENT(out) :: yi
8 ! nx: es la cantidad de elementos en x
9 ! i: es un entero que se usa en la rutina
10 INTEGER :: nx, i
11 nx = SIZE(x)
12 ! Si xi es menor al primer elemento del vector x, a yi se le
13 ! asigna el primer valor del vector y, saliendo de la rutina
14 IF (xi .LT. x(1)) THEN
15   yi = y(1)
16   RETURN
17 END IF
18 ! Si xi es mayor que el último elemento del vector x, a yi se le
19 ! asigna el último valor del vector y, saliendo de la rutina
20 IF (xi .GT. x(nx)) THEN
21   yi = y(nx)
22   RETURN
23 END IF
24 ! iminloc busca el índice del elemento de x, x(i) que está más cercano a xi.

```

```

25 ! dabs es una subrutina que devuelve el valor absoluto
26 i = iminloc(dabs(x - xi))
27 ! Si algún valor de x coincide con xi, a yi se le asigna el valor de
28 ! y=f(x(i)), saliendo de la rutina
29 IF (x(i) .EQ. xi) THEN
30     yi = y(i)
31     RETURN
32 END IF
33 ! Si x(i) es mayor a xi, se utiliza el valor anterior x(i-1) para la interpoación
34 IF (x(i) .GT. xi) i = i - 1
35 ! Se procede a interpolar el valor y=f(xi) y se sale de la rutina
36 yi = y(i) + (xi - x(i))*(y(i + 1) - y(i))/(x(i + 1) - x(i))
37 END SUBROUTINE interpolant

```

Listing 3.1. Interpolación 1D

```

1 SUBROUTINE interpolant2d(x, y, z, xi, yi, zi)
2 ! x: vector con valores conocidos de x ordenados de menor a mayor
3 ! y: vector con valores conocidos de y ordenados de menor a mayor
4 ! z=f(x, y)
5 ! xi, yi: par de (x,y) para el que se quiere conocer zi=f(xi, yi)
6 ! zi: valor de salida
7 IMPLICIT NONE
8 REAL*8, DIMENSION(:), INTENT(in) :: x, y
9 REAL*8, DIMENSION(:, :), INTENT(in) :: z
10 REAL*8, INTENT(in) :: xi, yi
11 REAL*8, INTENT(out) :: zi
12 INTEGER :: nx, i
13 REAL*8, DIMENSION(2) :: z_aux
14 nx = SIZE(x)
15 IF (xi .LE. x(1)) THEN ! <=
16     CALL interpolant(y, z(1, :), yi, zi)
17     RETURN
18 ELSE IF (xi .GE. x(nx)) THEN ! >=
19     CALL interpolant(y, z(nx, :), yi, zi)
20     RETURN
21 END IF
22 i = iminloc(dabs(x - xi))
23 IF (x(i) .GT. xi) i = i - 1 ! >
24 CALL interpolant(y, z(i, :), yi, z_aux(1)) ! z1=f(x1,yi)
25 CALL interpolant(y, z(i + 1, :), yi, z_aux(2)) ! z2=f(x2,yi)
26 CALL interpolant(x(i:i + 1), z_aux, xi, zi) ! zi=f(xi,yi)
27 END SUBROUTINE interpolant2d

```

Listing 3.2. Interpolación 2D

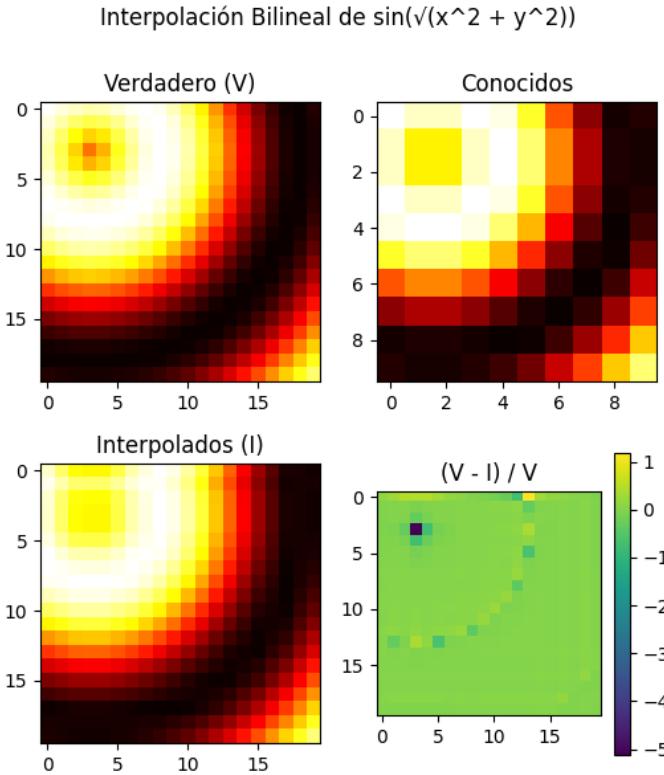


Figura 3.1. Interpolación bilineal de  $\sin(\sqrt{x^2 + y^2})$

Si bien hay otros métodos para estimar el valor de  $C_D$  para dos valores ( $\Delta P; l_v$ ), este método es sencillo y da resultados satisfactorios. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo del error obtenido con este método para interpolar una función de prueba  $f = \sin(\sqrt{x^2 + y^2})$ .

La malla rectangular requerida para la interpolación bilineal del mapa de  $C_D$  se realizará a partir de los valores conocidos de  $C_D$  resultantes de las flujometrías con *OpenFOAM* ([Foundation, s.f.](#)). Debido al costo computacional que requieren la flujometría, solo una cantidad reducida de puntos se obtendrá con este método, esto significa que se tiene como punto de partida una malla no rectangular por lo que se utiliza un método intermedio para obtener una matriz de puntos que pueda ser leído por la interpolación bilineal.

Se probaron dos métodos para realizar la interpolación, el método del punto más cercano y la interpolación por la suma de la inversa de la distancia o IDW por sus siglas en inglés (*Inverse Distance Weighting*). Estos se combinan métodos de con suavizados de promedio móvil con los  $n$  valores más cercanos.

El método del punto más cercano consiste en asignar para cada par  $(x, y)$  el valor

conocido más cercano, el algoritmo es como se indica a continuación:

---

**Algoritmo 1:** Interpolación por punto más cercano

---

**Entrada:**

$V_x, V_y$ : valores de  $x, y$  en los que se conoce el valor en  $z$ .

$V_z$ : valores conocidos de  $z$ .

$I_x$ :  $n$  puntos de  $x$  donde se quiere interpolar

$I_Y$ :  $m$  puntos de  $y$  donde se quiere interpolar

**Resultado:** Devuelve una matriz  $I_{[n,m]}$  con los valores interpolados, donde

cada punto  $I(x, y)$  se le asigna al valor de  $V_Z$  más cercano  
conocido. Da como resultado superficies escalonadas.

---

```

1  $I = zeros_{[n,m]}$ ;
2 para  $i \leftarrow 0$  a  $n$  hacer
3   para  $j \leftarrow 0$  a  $m$  hacer
4      $d = \sqrt{(V_x - I_{xi})^2 + (V_y - I_{yj})^2}$ ;
5      $I[i, j] = v_z[\min(d)]$ ;
```

---

La interpolación IDW consiste en asignar a cada punto el resultado de un promedio de los valores cercanos al punto en cuestión, ponderado por la distancia al valor elevado a un exponente arbitrario  $p$ . Cuanto mayor sea el valor de  $p$ , más sensible es el método a los valores cercanos, la formulación de este método se ve en la ecuación 3.1 y la algoritmo utilizado para calcular esto se detalla en 2 En la figura 3.2 se muestra una comparación de ambos métodos, para una malla de  $C_D = f(\Delta_P, l_v)$  generada al azar.

$$f_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (3.1)$$

### 3.2.2 Área de referencia

El área de referencia utilizada por ICESym ese el área de cortina 2.11 y se expresa en el código del programa como el área efectiva  $F_V = A_R \cdot C_D$ . Cómo se indica en el apartado 2.3.4, para el MRCVC el área de referencia es el área frontal del puerto expuesta a la cámara, calculada como la altura de la ranura  $h_p = 29.4$  mm multiplicada por la

---

**Algoritmo 2:** Interpolación IDW

---

**Entrada:**

$V_x, V_y$ : valores de  $x, y$  en los que se conoce el valor en  $z$ .

$V_z$ : valores conocidos de  $z$ .

$I_x$ :  $n$  puntos de  $x$  donde se quiere interpolar

$I_Y$ :  $m$  puntos de  $y$  donde se quiere interpolar

$p$ : potencia a la que se eleva cada peso

**Resultado:** Interpolación ponderada por inverso de la distancia.

Dependiendo del valor de  $p$ , se obtienen valores más o menos suavizados.

```

1  $I = zeros_{[n,m]}$ ;
2 para  $i \leftarrow 0$  a  $n$  hacer
3   para  $j \leftarrow 0$  a  $m$  hacer
4      $d = [(V_x - I_{xi})^2 + (V_y - I_{yj})^2]^{\frac{p}{2}}$ ;
5     si  $\exists i : d[i] = 0$  entonces
6        $I[i, j] = V_z[i]$ ;
7     en otro caso
8      $I[i, j] = \frac{\sum V_{zi}/d_i}{\sum \frac{1}{d}}$ ;

```

---

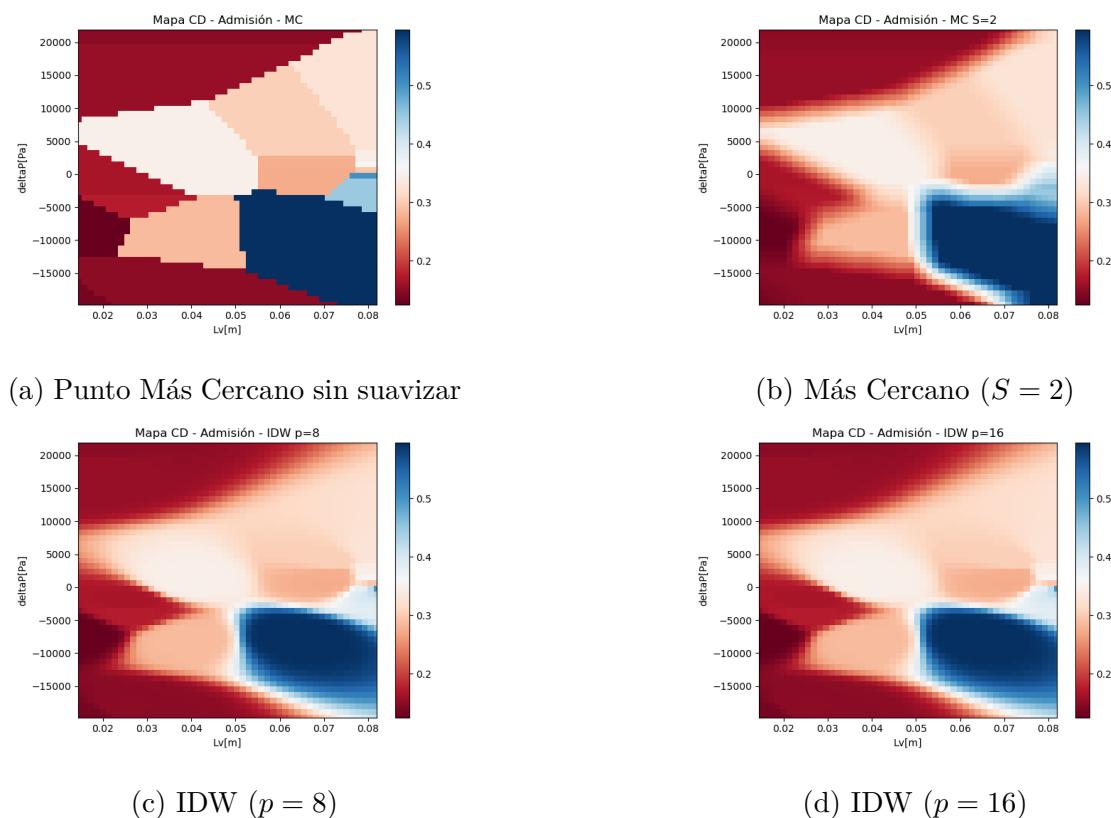


Figura 3.2. Comparación de interpolaciones

distancia entre el borde del puerto y la paleta que delimita la cámara, denominado como  $l_v$ .

Este valor se afecta por el coeficiente de descarga intermedio  $C_{D,int}$ , que puede ser un valor fijo o el resultado de interpolar de un mapa de  $C_D$  para un valor de cuerda y  $\Delta_P$  dado, como se indica en la ecuación 3.2.

$$F_v = C_{D,int} \cdot 0.0294 \cdot l_v \quad (3.2)$$

Tanto al inicio como al cierre del puerto ocurre solape de cámaras, por lo que en estos intervalos angulares hay un valor de  $C_D$  para cada cámara. Este se calcula con el flujo másico que atraviesa los parches correspondientes a cada cámara y el área de puerto expuesta por cada cámara.

### 3.2.3 Interfaz con optimizador

Para lograr ejecutar el simulador automáticamente, se hizo una librería de funciones capaz de tomar como dato de entrada un archivo de configuración que incluye geometría, velocidades a ejecutar y cantidad de ciclos de simulación entre otros.

Para ejecutar una instancia de ICESym se puede utilizar la interfaz gráfica de usuario ó la interfaz de línea de comando.

Puesto que se utiliza el programa desarrollado para este trabajo y la simulación se realiza de manera automática aprovechando la cualidad de “caja negra” de ICESym y se utiliza la interfaz de línea de comandos. El simulador se ejecuta como un archivo de Python “» python main.py”, este archivo contiene las instrucciones que lanzan la simulación del motor con una configuración dada. Esto permite ejecutar la simulación de manera automatizada ya que el comando para ejecutar el simulador se puede lanzar desde otro programa de python con permisos para ejecutar comandos dentro de una consola de (en este caso) Linux.

### 3.3 Optimizador y Algoritmo Genético

Se seleccionó un algoritmo genético para realizar la optimización de la geometría del MRCVC por la simplicidad y facilidad de implementación del mismo. Si bien este tipo de métodos no garantizan que se alcance un resultado óptimo, en la práctica se ha observado que alcanzan soluciones muy cercanas a las óptimas tras pocas iteraciones del método (Goldberg, 1989)(Shi et al., 2011).

Una de las ventajas de este método es que no requiere información del gradiente de la función que se está evaluando, lo cual es útil cuando no se puede asegurar la existencia de la derivada de la función en todo el dominio ó cuando se tiene una función con más de un máximo o mínimo local. Además, el punto de partida de la optimización es una población generada al azar, de modo que se tiene un muestreo aleatorio del dominio que se está evaluando. Esto hace que el método sea poco susceptible a caer en un óptimo local.

Se puede decir que un algoritmo genético es un método de búsqueda aleatoria guiada. ¿Cómo difieren los AG de los métodos tradicionales de búsqueda?

1. Los AG pueden operar sobre una representación de las variables estudiadas y no necesariamente sobre las variables de estudio.
2. Cada iteración utiliza un conjunto de datos con cierto grado de aleatoriedad..
3. Utilizan una función objetivo para evaluar cada punto sin necesidad de conocer la derivada de la función que se está evaluando.
4. Los AG usan reglas probabilísticas, no deterministas.

Otros métodos de optimización se mueven de un punto al siguiente en el espacio solución, basándose en alguna regla de decisión lo que puede dar como resultado un máximo (o mínimo) local.

Los mecanismos básicos que hacen a un algoritmo genético son: 1) SELECCIÓN, 2) CRUZA y 3) MUTACIÓN, el funcionamiento básico se sintetiza en el pseudocódigo 3.

La SELECCIÓN consiste en crear individuos a partir del puntaje que devuelve una función objetivo, la cual es la encargada de guiar el proceso de optimización dando mayor o menor puntaje a un candidato según el resultado que se quiere obtener. Este paso significa que aquellos individuos a los cuales se les asignó un puntaje más elevado tienen más probabilidades de ser copiados o “transmitir” sus parámetros a la iteración siguiente,

este proceso imita en cierta forma la selección natural o evolución Darwiniana y de aquí viene el nombre de algoritmo genético o evolutivo.

El segundo operador es la CRUZA, consiste en combinar los parámetros de dos individuos para obtener uno nuevo, esto se asemeja a la reproducción.

Finalmente la MUTACIÓN es la encargada de modificar aleatoriamente uno o más parámetros de cada nuevo individuo. Este operador juega un rol secundario pero muy importante, es secundario porque se pueden alcanzar soluciones satisfactorias sin incluir este mecanismo sin embargo, se utiliza con probabilidades pequeñas para evitar la pérdida temprana de información relevante. Si la probabilidad de mutación es muy alta, el AG se convierte en un algoritmo de búsqueda aleatoria.

---

### **Algoritmo 3:** Algoritmo de optimización

---

- 1 generación = 0; Inicializar población.;
  - 2 **mientras** *No se cumpla condición de parada* **hacer**
  - 3     SELECCIÓN se crean y seleccionan los individuos más aptos.;
  - 4     CRUZA los candidatos seleccionados (creación de la anueva población);
  - 5     MUTACIÓN algunos individuos de la nueva población;
  - 6     generación = generación + 1;
  - 7     **si** *Verifica condición de parada entonces*
  - 8         └ Parar;
  - 9 Guardar resultados;
- 

Gran parte de este trabajo fue utilizar a ICESym como parte de la función objetivo aprovechando la cualidad de “caja negra” que se le puede dar al simulador. Para lograr esto se modificó parte del código de ICESym con el objetivo de facilitar la configuración, ejecución y lectura de los resultados que arroja el simulador y así poder ejecutar de manera automática una simulación con una configuración particular del motor. Otro aspecto del optimizador que se desarrolló es el de poder ejecutar múltiples instancias de ICESym en paralelo para reducir el tiempo de ejecución cada simulación, pudiendo evaluar varios motores (o individuos) al mismo tiempo.

Para la primer iteración se programaron desde cero los algoritmos y funciones necesarias para llevar a cabo la optimización, posteriormente se tomo la la librería DEAP ([Fortin et al., 2012](#)) y se modificaron los operadores a medida, para poder utilizarlos con ICESym.

En los apartados siguientes se describe la implementación de cada uno de los operadores en el optimizador.

### 3.3.1 Población

Se decidió representar cada motor como un vector con las dimensiones y reglaje que definen la geometría del sistema de intercambio de gases, los cuales se listan en la tabla 3.1. Se limitó los valores que puede tomar cada parámetro para que la geometría resultante se asemeje a la geometría del motor utilizado en trabajos anteriores.

Nº	Parámetro	Descripción	Sistema	Límites
1	DTA	Diámetro de tubo	Admisión	[60, 100] mm
2	DTE	Diámetro de tubo	Escape	[60, 100] mm
3	LIT	Largo de tubo	Admisión	[300, 2000] mm
4	LET	Largo de tubo	Escape	[300, 2000] mm
5	IIA	Ángulo de apertura	Admisión	[0,90] <sup>o</sup>
6	IFA	Ángulo geométrico de cierre	Admisión	[IIA, 90] <sup>o</sup>
7	IIE	Ángulo geométrico de apertura	Escape	[0, 90] <sup>o</sup>
8	IFE	Ángulo geométrico de cierre	Escape	[IIA, 90] <sup>o</sup>

Tabla 3.1. Parámetros que representan al motor

Se decidió representar los vectores que hacen a cada motor como un número binario de 40 dígitos, ocupando 5 dígitos para representar cada uno de los 8 parámetros que hacen a cada motor. Esto facilita la implementación de los operadores de selección, cruza y mutación, pudiendo aprovechar implementaciones de operadores existentes en librerías como DEAP. Estos 8 números binarios luego se convierten una lista de enteros que mediante un cambio de escala  $f(x)$ , en la que se ingresa con un entero entre 0 y  $2^n - 1$ , siendo  $n$  la cantidad de dígitos del binario (en este caso 5). Los coeficientes  $a$  y  $b$  son tal que  $f(0) = x_0$  y  $f(2^n - 1) = x_1$ , donde  $x_0$  y  $x_1$  son los extremos del rango para el que se quiere aplicar la transformación. Los coeficientes  $a$  y  $b$  son particulares a cada parámetro, porque se determinan de acuerdo a los valores que puede tomar cada uno.

De este modo se obtienen el valor de cada uno de los parámetros que hacen a la configuración particular de cada motor en ICESym, ver figura 3.3. El orden de los mismos

se mantiene constante, por lo que cada sección del número representa una característica en particular del motor.

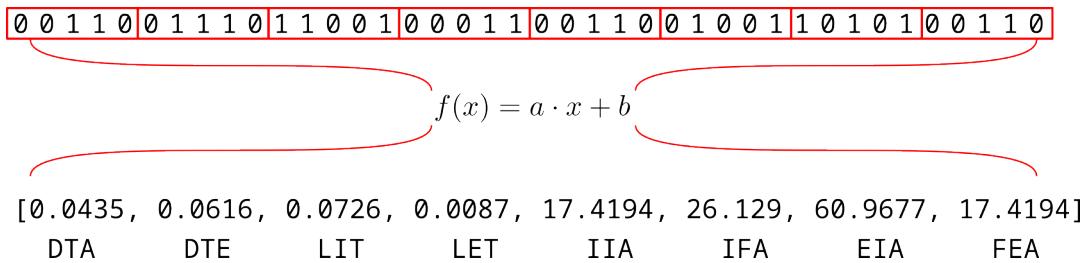


Figura 3.3. Individuo como binario

### 3.3.2 Reproducción

Para crear la nueva población se debe elegir a los nuevos candidatos basándose en los puntajes de la población actual, hay varios métodos diferentes de selección, como son de ruleta, aleatoria, por puntaje y de tipo torneo. El método seleccionado es el torneo, el cual consiste en comparar los puntajes de  $n$  individuos seleccionados al azar y el que tenga el mejor puntaje es el seleccionado o ganador. La cantidad de individuos comparados  $n$  es el tamaño de muestreo o de torneo, cuanto más grande sea este número más posibilidades tiene de ganar los individuos con mayor puntaje y la cantidad de rondas del torneo determina la cantidad de individuos seleccionados para participar en la próxima iteración o generación de candidatos.

### 3.3.3 Cruza

El operador de cruce se encarga de combinar los genes de dos individuos para producir un individuo nuevo, la función es la de intercambiar los parámetros que hacen a uno y otro para dar lugar a una nueva posible solución. Para individuos representados por un vector se suelen usar operadores de tipo curva de uno o múltiples puntos como también cruce uniforme. El método seleccionado es *cruza de dos puntos*, en este método se corta el vector que forma al individuo en dos puntos, la posición de estos puntos se selecciona al azar, manteniendo el largo original de los vectores. Luego los individuos “cruzados” se combinan de forma complementaria, como en la figura 3.4, en el algoritmo 4 se esquematiza el proceso.

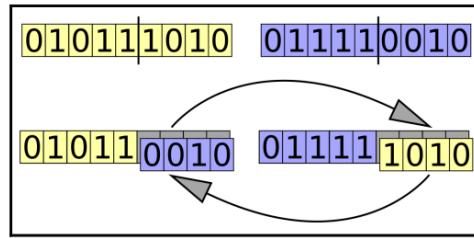


Figura 3.4. Cruza de dos puntos

---

**Algoritmo 4:** Cruza de dos puntos

---

**Entrada:**

$ind_1, ind_2$ : dos individuos de entrada [101...011], [110...100]

EA(a, b): devuelve un Entero al Azar entre los enteros a y b.

L(a): devuelve la cantidad de elementos en a.

**Salida:**

$ind_1, ind_2$ : individuos de entrada modificados

```

1 s = min(L(ind1), L(ind2));
2 CX1 = EA(1, s);
3 CX2 = EA(1, s-1);
4 si CX1 ≥ CX2 entonces
5   CX2 = CX2 + 1;
6 en otro caso
7   aux = CX1;
8   CX1 = CX2;
9   CX2 = aux;
10 aux = ind1;
11 ind1[CX1 : CX2] = ind2[CX1 : CX2];
12 ind2[CX1 : CX2] = aux[CX1 : CX2];
13 devolver ind1, ind2;
14 Terminar el programa;
```

---

### 3.3.4 Mutación

La mutación juega un rol secundario pero importante, una pequeña probabilidad de que alguno de los genes se modifique en un valor aleatorio contribuye a que el algoritmo genético no se estanque en soluciones máximos o mínimos locales.

Algunos de los métodos de mutación utilizados son:

1. FLIP BIT
2. INTERCAMBIO,
3. INVERSION
4. REORDENADO ALEATORIO

En este trabajo se utiliza el método de reordenado aleatorio en el cual se modifica al azar el orden de los números que hacen al individuo, modificando la lista que lo define, por ejemplo: 12345 → 12543.

### 3.3.5 Función objetivo

La función objetivo es la encargada de dar puntaje a los individuos, en la analogía con la selección natural esta función es el ambiente. Determina la aptitud de un motor con respecto a otro en lo que respecta *performance* del sistema de intercambio de gases. Inicialmente se propuso que la función objetivo sea la suma de los rendimientos volumétricos a todas las velocidades simuladas  $s = \sum \eta_v$ , este tipo de funciones dió como resultado una curva de  $\eta_v$  aserrada como se muestra en la figura 3.5.

Esta curva aserrada es poco deseable porque significa una entrega de torque y potencia dispar, por este motivo se modificó la función objetivo para favorecer curvas suaves y preferentemente con un solo punto de inflexión. Se implementó una suma ponderada para obtener un rendimiento volumétrico máximo en un valor de 6000 RPM aprovechando las características de balanceo de fuerzas y mayores velocidades de giro de los motores rotativos. La aptitud resulta de la suma del rendimiento volumétrico y el inverso de la fracción de gases residuales, esto provó ser la función objetivo que mejores resultados dió. La metodología utilizada se resume a continuación.

1. Se evalúa cada motor, calculando el rendimiento volumétrico  $\eta_v$  y fracción de gases residuales  $x_r$  para cada velocidad de giro simulada.

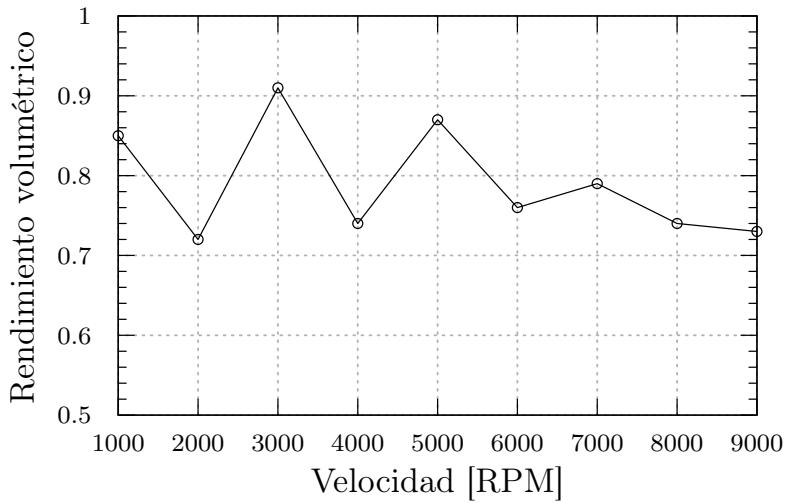


Figura 3.5. Curvas de rendimiento volumétrico aserradas

2. Con  $\eta_v = (\eta_{v,1}, \dots, \eta_{v,n})$  y  $x_r = (x_{r,1}, \dots, x_{r,n})$  se hace una suma para cada velocidad  
 $S_i = \eta_{v,i} + x_{r,i}^{-1}$ .
3. Cada motor tiene un vector o lista de valores  $S = (S_1, \dots, S_n)$  para cada velocidad evaluada, con esta lista se calcula el puntaje del motor como:

$$f = \sum_{i=1}^n S_i + S_k^2 \quad (3.3)$$

$S_k$  es el puntaje para la  $k$  velocidad de giro (6000 RPM en este caso) y se eleva al cuadrado para favorecer altos rendimientos en esta velocidad.

Durante las primeras iteraciones del método hay una gran cantidad de geometrías inválidas que devuelven puntaje muy bajo o nulo. En caso de que alguna de las soluciones tenga un puntaje relativamente alto, existe la posibilidad de una dominancia temprana de la población, provocando una convergencia temprana de la optimización. Estos motores tienen una mayor probabilidad de “pasar” sus características geométricas a las iteraciones siguientes y es algo especialmente problemático en optimizaciones poblacionales de alrededor de 100 individuos. Para reducir la posibilidad de una convergencia temprana se utiliza un método de escalado de puntajes, que consiste en una transformación lineal. Definiendo el puntaje bruto de un individuo como  $f$  y el puntaje escalado es  $f'$ , la relación entre ambos es  $f' = a \cdot f + b$ .

Los coeficientes  $a$  y  $b$  se determinan de modo que  $f'_{media} = f_{media}$ , de este modo un motor con puntaje promedio tiene la misma influencia sobre la población ya sea con

la aptitud original o escalada. Para controlar la influencia de del mejor individuo de una generación sobre la próxima, los puntajes se transforman de tal modo que  $f'_{max} = C_{mult}f_{media}$ . El valor de  $C_{mult}$  es la cantidad de copias que se espera obtener del mejor de los candidatos en la generación siguiente y se usa en 1.2 a 2 para poblaciones de entre 50 y 100 individuos.

Hacia el final de una corrida de optimización  $C_{mult}$  agranda las diferencias entre puntajes de individuos.

En caso de existir individuos con puntaje muy bajo o nulo se hace un pre-escalado del puntaje que fija el mínimo en  $f'_{min} = 0$ , el procedimiento se lista en los algoritmos 5 y 6.

---

### **Algoritmo 5:** Algoritmo de pre-escalado

---

#### **Entrada:**

$F$ , es un vector que contiene los puntajes de todos los individuos;

$C_{mult}$ , es un multiplicador para el escalado, se suele usar  $f \in [1.2, 2]$ ;

#### **Salida:**

$a, b$ , son los coeficientes para la transformación lineal  $f(x) = a \cdot x + b$ ;

```

1  $u_{max} = \max(F);$ 
2  $u_{min} = \min(F);$ 
3  $u_{medio} = \text{media}(F);$ 
4 si  $u_{min} > aux = (C_{mult} \cdot u_{medio} - u_{max}) / (C_{mult} - 1)$  entonces
5    $\Delta_u = u_{max} - u_{avg};$ 
6    $a = (C_{mult} - 1) \cdot u_{avg} / \Delta_u;$ 
7    $b = u_{avg} \cdot (u_{max} - C_{mult} \cdot u_{avg}) \Delta_u;$ 
8 en otro caso
9   si  $\Delta \neq 0$  entonces
10     $a = u_{avg} / \Delta_u;$ 
11     $b = -u_{min} \cdot u_{avg} / \Delta_u ;$ 
12     $a = 1;$ 
13     $b = 0;$ 
14 devolver  $a, b$ 

```

---

---

**Algoritmo 6:** Escalado de población

---

**Entrada:**

$f$ , es la aptitud.

$a, b$ , son los parámetros de la función de pre-escala.

**Salida:**

$f^*$ , los puntajes escalados.

```

1  $a, b = \text{PreEscalado}(f, 2);$ 
2  $f^* = () ;$ 
3  $n = \text{Largo}(f);$ 
4 para  $i = 1$  a  $n$  hacer
5    $f_i^* = a \cdot f_i + b;$ 
6 devolver  $f^*;$ 
```

---

## 3.4 OpenFOAM

Las flujometrías se realizaron con *OpenFOAM*, un software de Fluidodinámica Computacional, o CFD por sus siglas en inglés, de código libre y abierto escrito en “C++”. Junto con este programa se utilizaron otras herramientas libres para generar la geometría a modelar y post-procesar los resultados..

### 3.4.1 Metodología

El esquema de trabajo para realizar las simulaciones consistió en:

1. Pre-procesado

- (a) Definir la geometría a analizar.
- (b) Generar una malla con un tamaño de elemento adecuado, la solución a problemas de CFD depende fuertemente de la cantidad y tamaño de celdas utilizadas.
- (c) Seleccionar los modelos adecuados.
- (d) Definir las propiedades del fluido.
- (e) Definir las condiciones de borde.

2. Solver

- (a) Seleccionar el solver a utilizar.
  - (b) Ejecutar la simulación.
3. Post-procesado
- (a) Visualizar los resultados de las distintas variables de la simulación.
  - (b) Extraer la información necesaria.

### 3.4.2 Configuración

Para configurar una simulación de OpenFOAM se configura el directorio de simulación como se indica en la figura 3.6a y 3.6b, cada directorio contiene una carpeta con condiciones iniciales “0”, malla “constant”, configuraciones particulares de cada solver “system” y una carpeta con los resultados del post-preprocesado realizado durante cada paso de simulación o al final del proceso.

En el directorio “0” se dejan las condiciones iniciales y de borde de cada simulación, utilizando una configuración genérica con parámetros definidos en un archivo con los valores de condiciones iniciales, aprovechando las características paramétricas de OpenFOAM, que permite corridas de una gran cantidad de simulaciones en serie.

Estos archivos de condiciones iniciales se generan con un *script* que toma valores de las simulaciones de *ICESym*, como se indicó en la sección 2.3.2, en la que también se detallan las ecuaciones e hipótesis utilizadas para obtener dichos valores. La ejecución de las simulaciones también se automatizan con scripts de *bash* con los pasos para ejecutar las corridas con *ICESym*. Con los resultados de las simulaciones se procede a calcular/leer la magnitud del caudal máscico, necesario para el cálculo del coeficiente de descarga.

#### 3.4.2.1 Pre procesado

El preprocesado consiste en definir geometría y condiciones iniciales, los datos de partida se obtienen de las simulaciones con *ICESym*. Con los resultados del simulador se grafica la diferencia de presión entre el puerto de admisión o escape y la cámara de combustión en función de la apertura del puerto para velocidades de 1000 RPM a 9000 RPM. Un ejemplo de esto se puede ver en la figura 3.7, como es de esperarse se tienen mayores diferenciales de presión a mayores aperturas del puerto porque para estas alzadas se está en la apertura o cierre del mismo.

```
1 ./ejemplo_pimpleFoam
2   0
3     epsilon
4     k
5     nut
6     p
7     U
8   constant
9     momentumTransport
10    polyMesh
11    transportProperties
12    triSurface
13  initialConditions
14  postProcessing
15    flowRatePatch_0
16    flowRatePatch_1
17    minMaxMagnitude
18  system
19    blockMeshDict
20    controlDict
21    decomposeParDict
22    flowRatePatch_0
23    flowRatePatch_1
24    fvSchemes
25    fvSolution
26    mapFieldsDict
27    meshQualityDict
28    minMaxMagnitude
29    snappyHexMeshDict
30    surfaceFeaturesDict
```

```
1 ./ejemplo_rhoPimpleFoam
2   |
3   |   0
4   |   |   alphat
5   |   |   epsilon
6   |   |   k
7   |   |   nut
8   |   |   p
9   |   |   T
10  |   |   U
11  |   constant
12  |   |   extendedFeatureEdgeMesh
13  |   |   fvOptions
14  |   |   momentumTransport
15  |   |   polyMesh
16  |   |   thermophysicalProperties
17  |   |   triSurface
18  |   initialConditions
19  |   postProcessing
20  |   |   cellMaxMag(U,p)
21  |   |   cellMinMag(U,p)
22  |   |   flowRatePatch_0
23  |   |   flowRatePatch_1
24  |   system
25  |   |   blockMeshDict
26  |   |   controlDict
27  |   |   decomposeParDict
28  |   |   flowRatePatch_0
29  |   |   flowRatePatch_1
30  |   |   fvSchemes
31  |   |   fvSolution
32  |   |   meshQualityDict
33  |   |   snappyHexMeshDict
34  |   |   surfaceFeaturesDict
```

(a) *pimpleFoam*

(b) *rhoPimpleFoam*

Figura 3.6. Esquema de directorios OpenFOAM

A diferencia del puerto de admisión, en el puerto de escape se ve una banda bastante definida de operación que se hace más “llena” a medida que se abre el puerto. Durante la apertura del puerto se ven las mayores diferencias de presión en las que hay dos bandas bien definidas, se toman algunos puntos arriba en la zona con mayor  $\Delta P$  y una cantidad menor para velocidades con  $\Delta P = 0$ . A medida que el puerto se abre la diferencia de presión con el gas en la cámara de combustión se equaliza y esta banda se afina, requiriendo menos puntos para caracterizar el funcionamiento de los mismos.

El valor de alzada está directamente relacionado con la posición angular del cigüeñal, por lo que una vez seleccionados los puntos de interés se puede extraer la geometría deseada de un modelo de CAD paramétrico del motor. Este modelo tiene solamente la mitad que

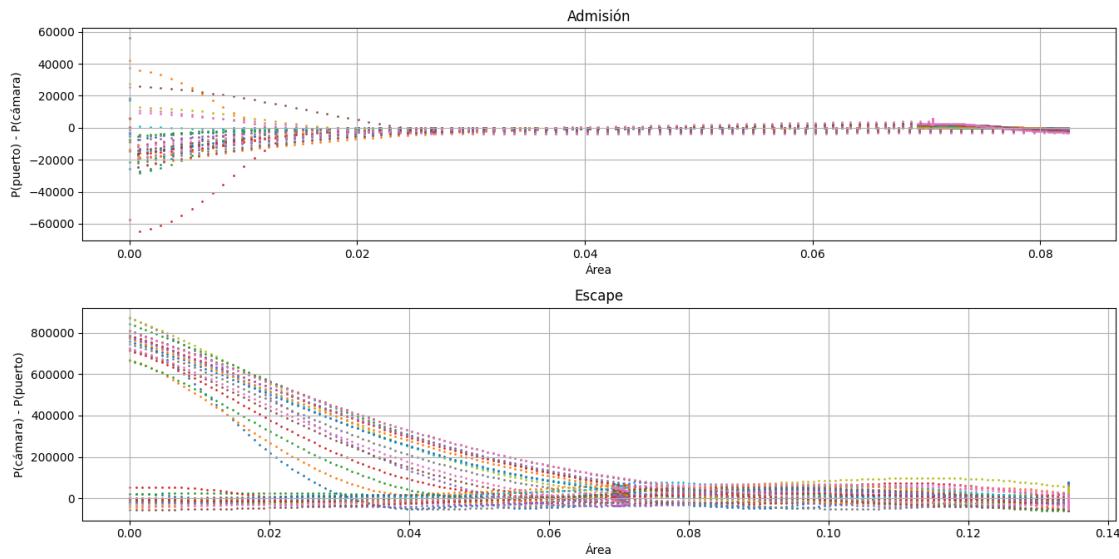


Figura 3.7. Presión en función de la apertura el puerto,  $\Delta P = f(l_v)$

contiene los puertos de admisión y escape, se obtuvo realizando operaciones geométricas con los volúmenes que representan diferentes componentes del motor como son el estator, rotor, paletas, etc. En la figura 3.8 se muestra parte del proceso para obtener el puerto de admisión a  $\theta = 50^\circ$ , en donde se suma el volumen del mismo en gris y las figuras que se restan que corresponden al rotor, las paletas y un paralelogramo para quitar una región que no se simuló.

Esta geometría fue generada por el programa FreeCAD ([Team, s.f.](#)), exportada a un archivo “.BREP”<sup>1</sup> para luego ser importada en Salome([Open Cascade, s.f.](#)), Salome se utiliza para generar una malla cerrada, hermética para que pueda ser procesada por los complementos de OpenFOAM utilizados para generar la malla de la simulación. Es importante que la hermeticidad de la malla, esto significa que los nodos en la frontera entre superficies coincidan, como se ve en la figura 3.9, en la que se ven dos superficies “walls” y “outlet” y los nodos compartidos entre ambas superficies.

El proceso en Salome consta de importar la geometría generada por FreeCAD y separar la misma en superficies utilizadas para definir condiciones de contorno en OpenFOAM, las superficies diferenciadas son: puerto, cámara/s, pared.

Luego de separadas estas superficies se procede a generar la malla en formato ASCII STL con el complemento de mallado de Salome. Se utilizó el generador de mallas NETGEN 1D-2D para crear la superficie, en general se configuró el software de modo de tener un

---

<sup>1</sup>Formato BREP, [opencascade.org](http://opencascade.org)

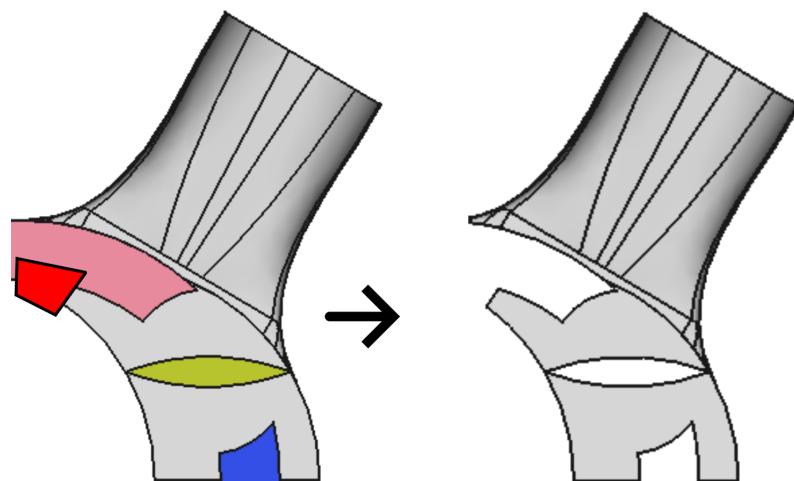


Figura 3.8. Puerto de admisión  $\theta = 50^\circ$  Modelado con FreeCAD

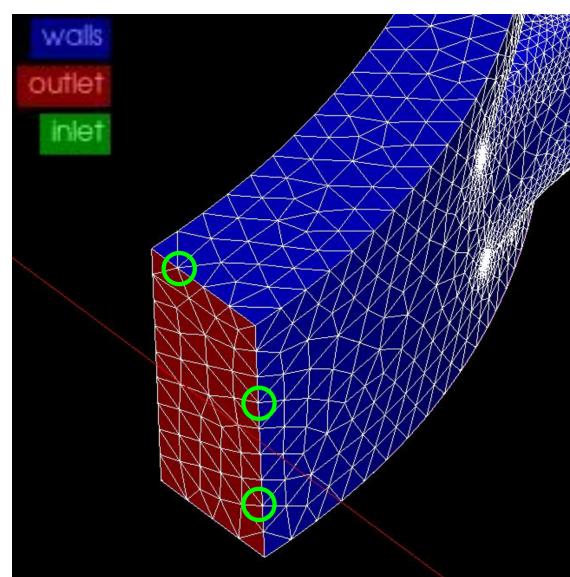


Figura 3.9. Malla hermética

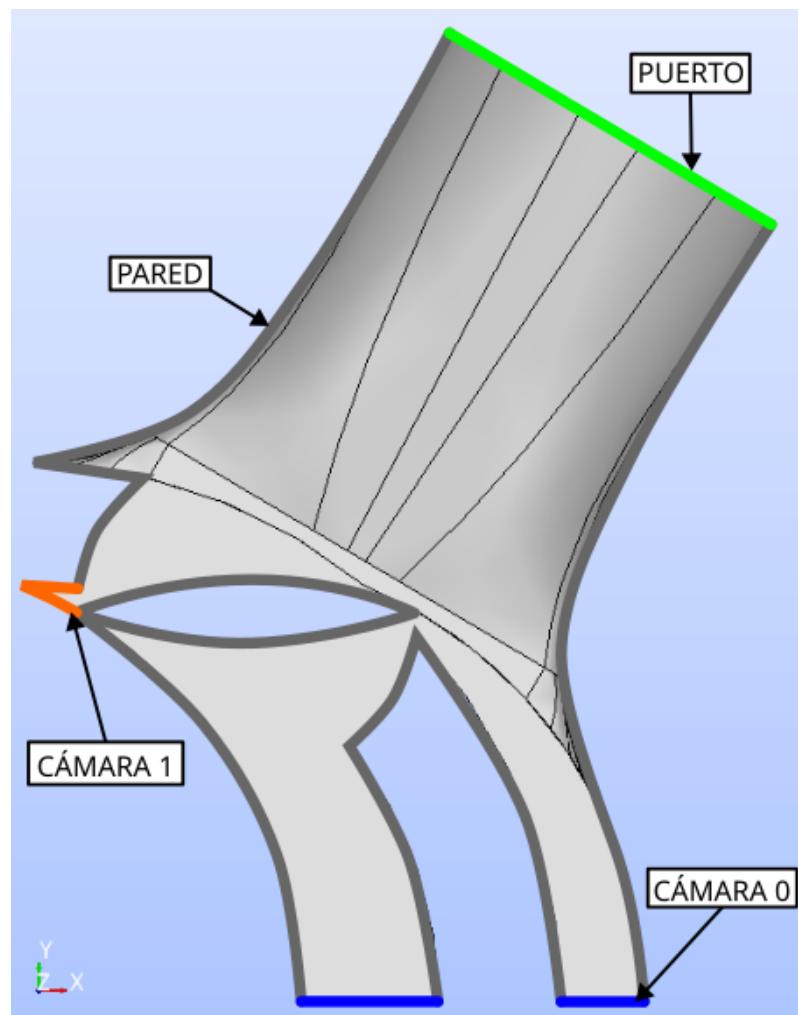


Figura 3.10. Nombres de Nombres de Parches

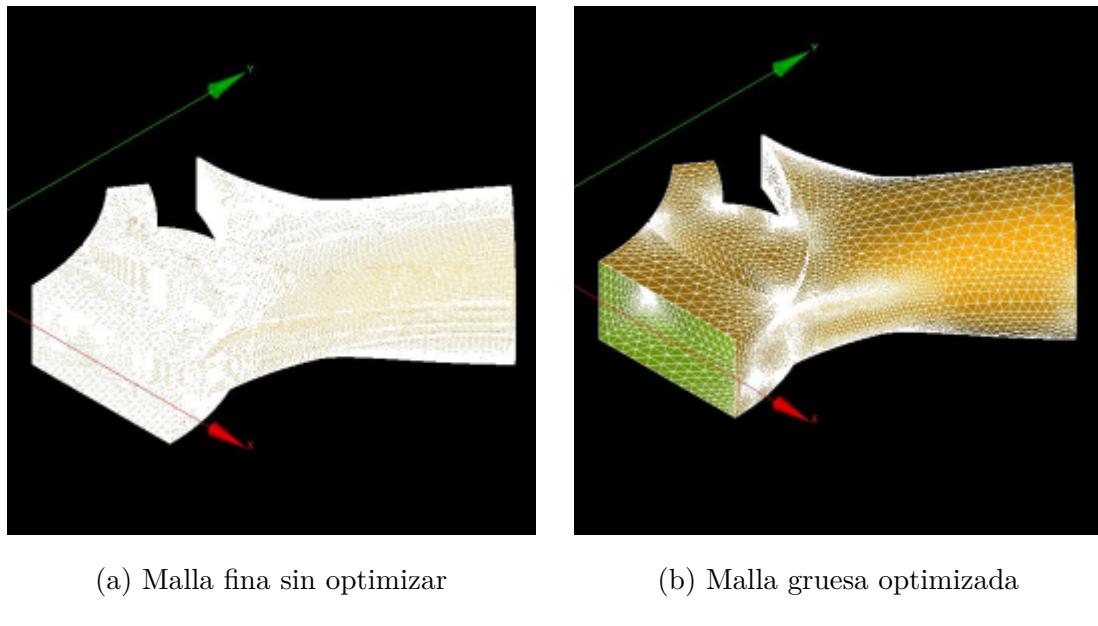


Figura 3.11. Diferentes mallas para flujo metrías

stl de buena calidad con elementos de menor tamaño en zonas de mayor curvatura. En la figura 3.11 se ve la diferencia en cantidad de nodos de dos mallas, una malla fina a la izquierda y una malla gruesa a la derecha. En la tabla 3.2 se muestra la diferencia entre algunos parámetros básicos de configuración para las dos mallas.

### 3.4.2.2 Malla

?? Una vez obtenido el archivo STL se procede a la generación de la malla dentro de OpenFOAM con *blockMesh* y *snappyHexMesh*. Primero se crea una malla con

Parámetro	Malla Fina	Malla Gruesa
Tamaño máximo	0.001	0.03
Tamaño mínimo	1E-7	2.4E-5
Limitado por curvatura	Sí	Sí
Optimizar	No	Sí
Cantidad de nodos	99311	49112
Cantidad de elementos	204695	103163

Tabla 3.2. Configuración de mallas mostradas en la figura 3.11

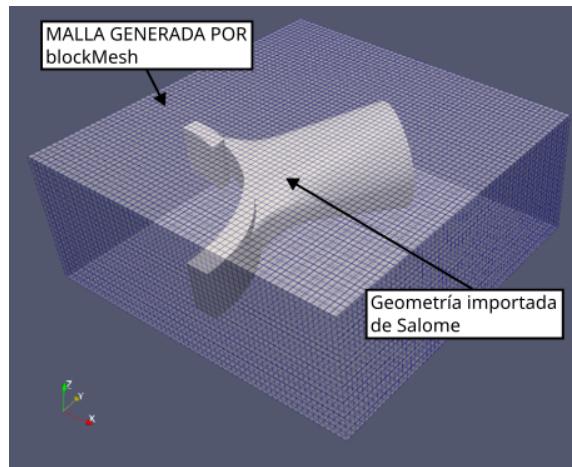
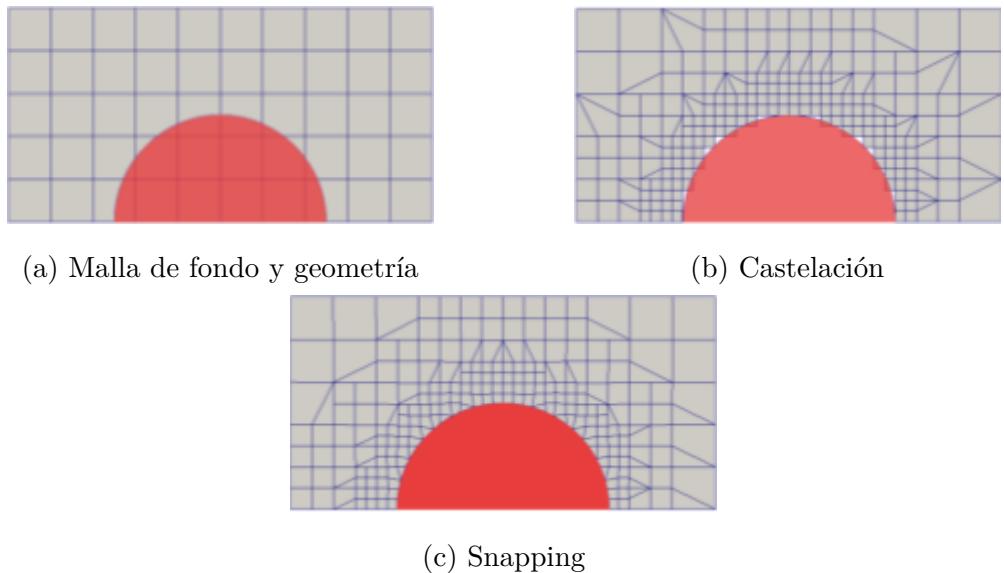


Figura 3.12. Malla de blockMesh y stl de Salome

Figura 3.13. Pasos de SnappyHexMesh([Montorfano, 2015](#))

*blockMesh* que debe contener la totalidad del volumen del puerto a simular, como se ve en la figura 3.12. En este paso se define el tamaño de base de la malla y el nivel general de refinamiento, a partir de estos cubos se produce el refinamiento por *castelación* que consiste en dividir las celdas en cubos más pequeños y luego aplicar el *snapping* para adaptarse a la superficie del volúmen que se está modelando, ver figura 3.13.

*blockMesh* crea una malla paramétrica con bloques con opción de gradientes de tamaños y bordes curvados, los bordes pueden ser líneas rectas, arcos o “splines”. La malla se genera o configura con un diccionario *blockMeshDict* ubicado en *constant/polyMesh*.

*snappyHexMesh* es un generador de malla que toma una malla existente y la *talla*

en la malla deseada, generando una malla 3D conformada por hexaedros y hexaedros partidos a partir de superficies de caras triangulares en formato de *estereolitografía* (STL por sus siglas en inglés). Además permite refinar zonas particulares de la geometría y un refinamiento mayor de la malla en la zona de la capa límite.

## 4. DESARROLLO

Los resultados obtenidos en cada uno de los pasos de este trabajo se detallan en este capítulo, comenzando por el motor obtenido en la primer iteración de optimización con el algoritmo genético junto con el modelo de CAD generado. Luego se muestran los resultados de las flujometrías realizadas a partir del modelo de CAD, incluyendo las mallas obtenidas para algunos casos seleccionados y el resultado detallado de algunas de las flujometrías, finalizando con el mapa de  $C_D$  obtenido, tanto para el puerto de admisión como para el puerto de escape.

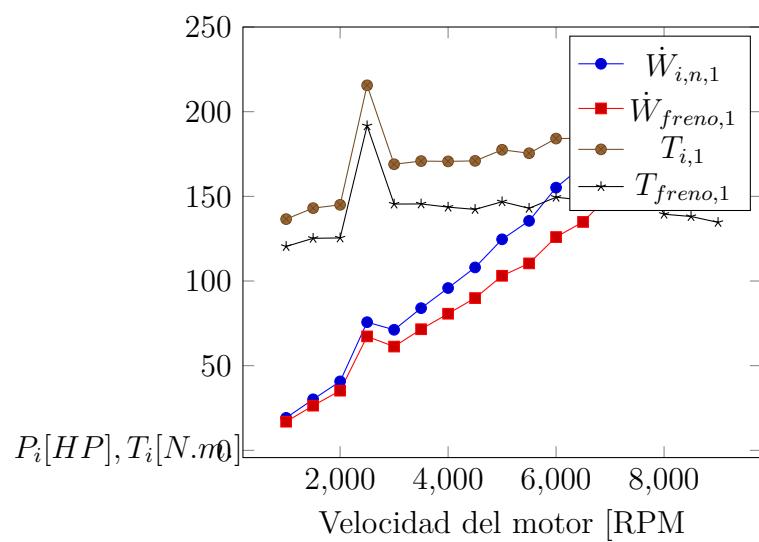
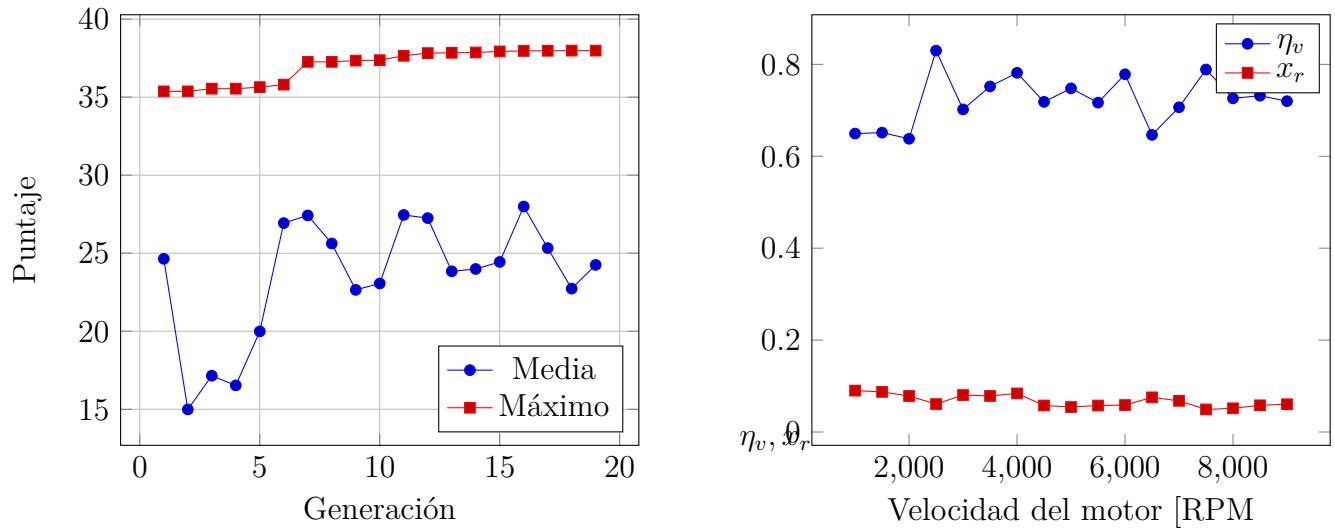
Por último se presentan los resultados de la segunda ronda de optimización con el algoritmo genético, en la que se utilizó el mapa de  $C_D$  obtenido en el paso previo.

### 4.1 Primer Iteración

La primer optimización se realizó partiendo de una población al azar, con los coeficientes de descarga constantes de 0.7 y 0.75 para el puerto de admisión y escape respectivamente. El algoritmo genético se ejecutó durante 100 generaciones con una población de 100 individuos y la función objetivo definida en la sección 3.3.5 con los pesos indicados, operadores y parámetros correspondientes indicados en la tabla 4.1.

En la gráfica de evolución se observa que se obtuvo rápidamente un individuo con un puntaje relativamente alto en las primeras iteraciones, el resultado final tiene una aptitud 1.5 veces la aptitud media de la población de la última generación, los parámetros que definen este candidato son los listados en la tabla y se ilustran en la figura 4.17. Este motor tiene un rendimiento volumétrico máximo de  $r_v \simeq 0.83$  para 2500 RPM y si bien la función objetivo favorece curvas suaves, se ven dos picos de rendimiento en la curva, siendo el segundo con  $r_v \simeq 0.79$  a 7500 RPM.

En la figura 4.2 se muestran las curvas de potencia y torque del motor, como es de esperarse se ve que ambas copian la curva de rendimiento volumétrico, con una potencia indicada máxima de 230 HP a 9000 rpm y un torque máximo de 210 N.m. a 7500 RPM.  
NOTA: FALTA CORREGIR ESTA POTENCIA CON EL MODELO DE FLOR O DE KNOLL



Parámetro	Valor
RPMS	$1000 \times [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]$
Pesos de función objetivo	(1, 1, 1, 6, 8, 9, 8, 7, 7)
Cantidad de ciclos de ICESym	2
Diámetro mínimo	0.05
Diámetro máximo	0.1
Longitud mínima de tubo	0.5
Longitud máxima de tubo	2
Ángulo mínimo	0
Ángulo máximo	90
Separación angular máxima	70
Tamaño de población	100
Tamaño de torneo	10
$\mu$	0
$\sigma$	1
$\alpha$	0.5
Probabilidad de crusa	0.9
Probabilidad de mutación	0.5
Cantidad de generaciones	20
Tamaño de <i>SALÓN DE LA FAMA</i>	1

Tabla 4.1. Configuración utilizada.

## 4.2 Modelo de CAD

A partir de los resultados obtenidos se realizó un modelo de CAD de los puertos que se ilustra en la figura 4.3 y 4.4. Se representó solamente la mitad superior del motor que contiene ambos puertos de admisión y escape, este modelo es paramétrico y permite rotar los componentes del motor para obtener distintas posiciones del conjunto para generar la geometría a evaluar.

La altura del puerto del lado de la cámara de combustión se mantuvo en dos tercios del a altura de cámara  $h_p = \frac{2}{3}h_c$ , manteniendo el eje central de cada puerto de forma que

Parámetro	Valor	Unidad
DTA	97.24	mm
DTE	81.15	mm
LIT	519.31	mm
LET	976.66	mm
IIA	1.12	grado
IFA	70.15	grado
EIA	85.14	grado
EFA	11.13	grado

Tabla 4.2. Mejor Candidato.



Figura 4.3. CAD Primer Iteración

intersecte el centro del motor con el propósito de eliminar una variable de la geometría a modelar. El foco de esta etapa de optimización es el diámetro del puerto y el reglaje.

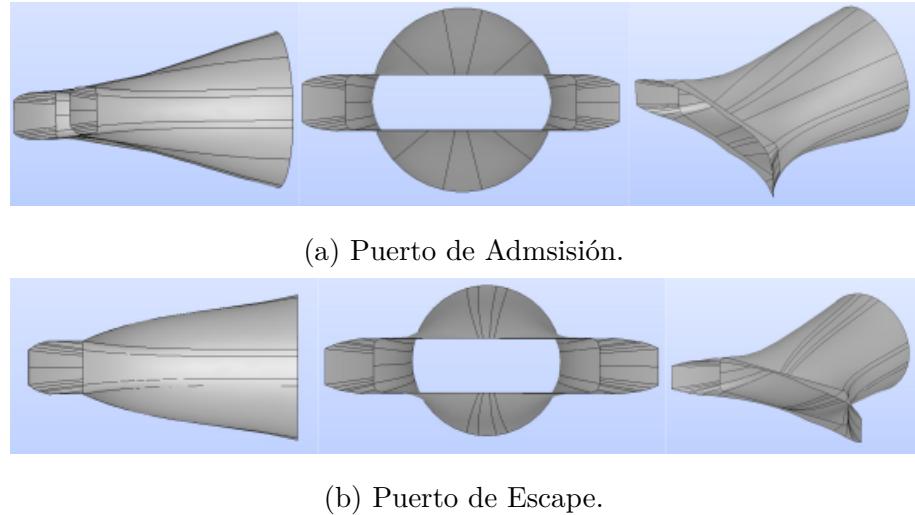


Figura 4.4. CAD Primer iteración (vistas fuera de escala).

### 4.3 Flujometrías

De la primera iteración se obtuvo la geometría y datos operativos del motor, con esto se representó la curva de diferencia de presión ( $\Delta P$ ) en función de la alzada ( $l_v$ ) de ambos puertos para diferentes velocidades de giro. Con estas gráficas se identificó puntos de mayor interés en los cuales realizar las flujometrías, los pares ( $l_v, \Delta P$ ) seleccionados para modelar el flujo del puerto se detallan en las figuras 4.5 y 4.6. Inicialmente se propusieron 51 flujometrías pudiendo realizar un total de 36 simulaciones que devolvieron 56 valores de  $C_D$ .

Algunas flujometrías se realizaron en tres etapas, partiendo de una malla gruesa con celdas de 15mm de tamaño inicial, culminando en celdas de 5mm. En otros se realizó directamente la flujometría con mallas base de 5mm.

En general se simuló alrededor de 0.02 segundos de flujo hasta alcanzar un valor estable del caudal másico, como se indica en la figura 4.7 donde se muestra el desarrollo de la simulación en términos de  $\dot{m}$  para el puerto de admisión con el cigüeñal en  $\theta = 10^\circ$ . La línea anaranjada sobre el final de la simulación representa la porción de datos que se seleccionó para calcular  $\dot{m}$ , esto se realizó tomando la media de los últimos  $n$  valores obtenidos.

Como se mencionó en el apartado 4, la modificación realizada a ICESym para funcionar con un mapa de  $C_D$  dependiente de dos variables requiere que los datos de entrada estén distribuidos en una grilla rectangular. A partir de las flujometrías realizadas se confeccionó

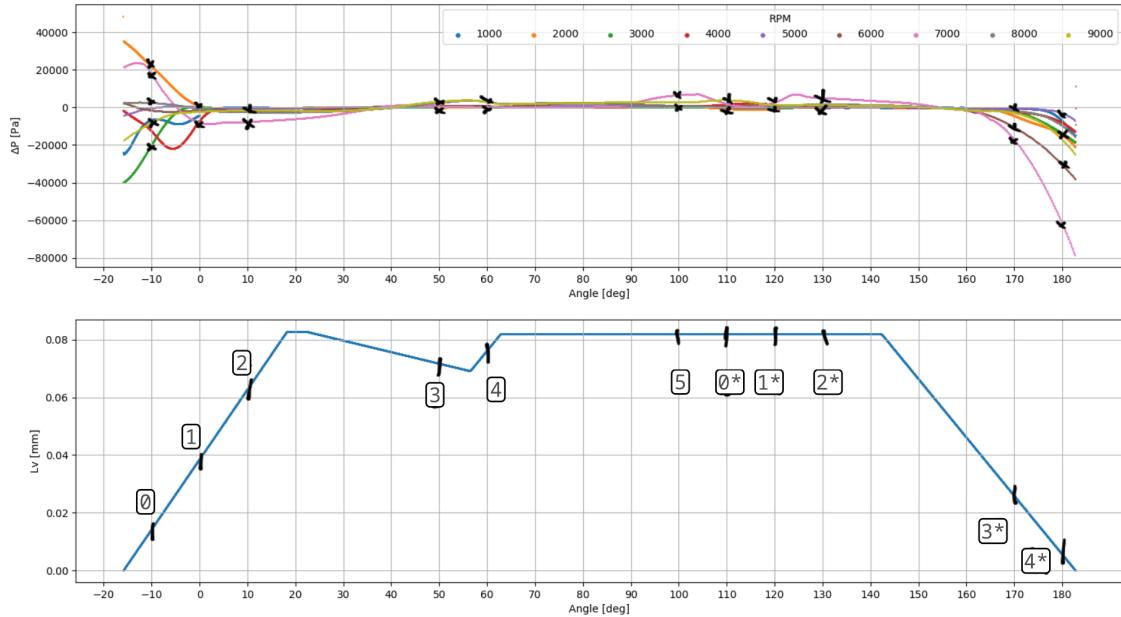


Figura 4.5. Flujometrías puerto de admisión

el mapa de  $C_D$ , la totalidad de puntos evaluados se presentan en las tablas 7.1 y 7.2 para el puerto de admisión y escape respectivamente. Los datos obtenidos no forman una grilla rectangular, se utilizó un método de interpolación de punto más cercano suavizado por promedio móvil con  $S = 2$  para generar dicha grilla a partir de los puntos conocidos de  $C_D$ , el resultado se ve en las figuras 4.8 y 4.9.

### 4.3.1 Puerto de Admisión

En el mapa del puerto de admisión se observa un máximo de  $C_{D,\max} \simeq 0.6$  para para  $l_v = 62.95\text{mm}$  y  $\Delta P \simeq -7.37\text{KPa}$ , obteniendo un flujo hacia afuera del puerto de  $122.09\text{g/seg}$ , para este caso se ve un reflujo de gases residuales apenas abre el puerto de admisión, este caso corresponde a un ángulo de cigüeñal de  $10^\circ$  a 7000 RPM. La flujometría correspondiente al último instante de la simulación se muestra en la figura 4.10, las líneas de corrienteven están coloreadas según el módulo de la velocidad y las flechas indican el sentido de flujo. La mayor velocidad de flujo se da en el gas que sale de la cámara de combustión residual que viene de descargar el gas al puerto de escape.

El menor valor de  $C_D$  se obtiene para el puerto de admisión en una posición muy próxima a la apertura,  $C_{D,\min} \simeq 0.12$  con un flujo hacia el puerto de  $\dot{m} \simeq 5\text{g/seg}$ ,  $l_v = 144.3\text{mm}$  y  $\Delta P = -6.57\text{KPa}$  para el puerto a  $590^\circ$  y 1 000 RPM, ver figura 4.11.

En términos de flujo máscico, el máximo es  $\dot{m}_{\max} \simeq 70\text{g/seg}$  y ocurre durante un período

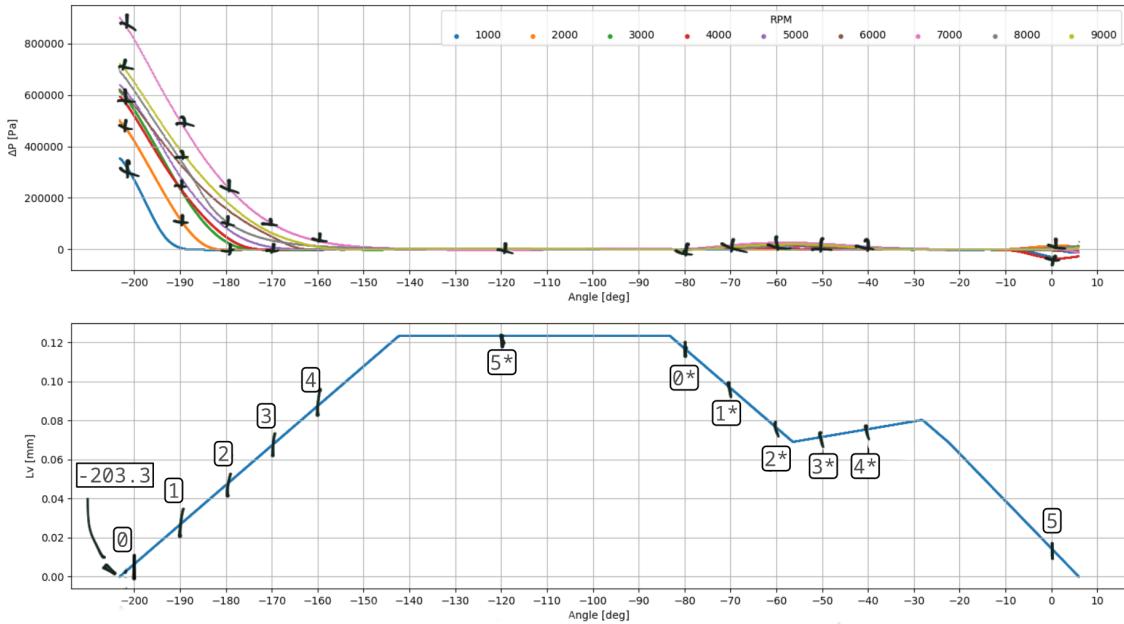


Figura 4.6. Flujometrías puerto de escape

de máxima apertura del puerto con  $l_v = 81.94\text{mm}$  y  $\Delta P = 4.95\text{KPa}$  siendo  $C_D = 0.32874$ , ver figura 4.12.

### 4.3.2 Puerto de Escape

Para el puerto de escape se observa el máximo  $C_{D,\max} = 0.57686$  para  $l_v = 87.76\text{mm}$ ,  $\Delta P = -1\text{KPa}$  con un flujo másico de  $145\text{g/s}$  hacia afuera para  $440^\circ$  a 9000 RPM, ver figura 4.13.

Para  $l_v = 16.83\text{mm}$  y  $\Delta_P = -652.9\text{KPa}$  se obtiene  $C_{D,\min} = 0.09631$  donde el flujo se encuentra bloqueado por la alta diferencia de presiones, alcanzando  $\dot{m} = 38.6\text{g/seg}$ , ver figura 4.14.

El flujo másico máximo es  $\dot{m} = 176.1\text{g/seg}$  para  $l_v = 87.76\text{mm}$  y  $\Delta_P = -334\text{KPa}$ , esto con el ciclo a  $440^\circ$  y 7000 RPM, ver figura 4.15.

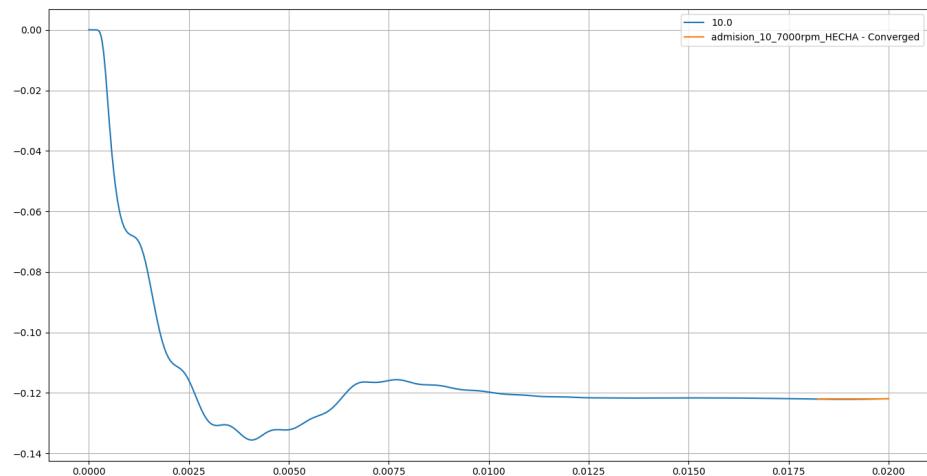


Figura 4.7. Puerto de admisión 10° 7000RPM

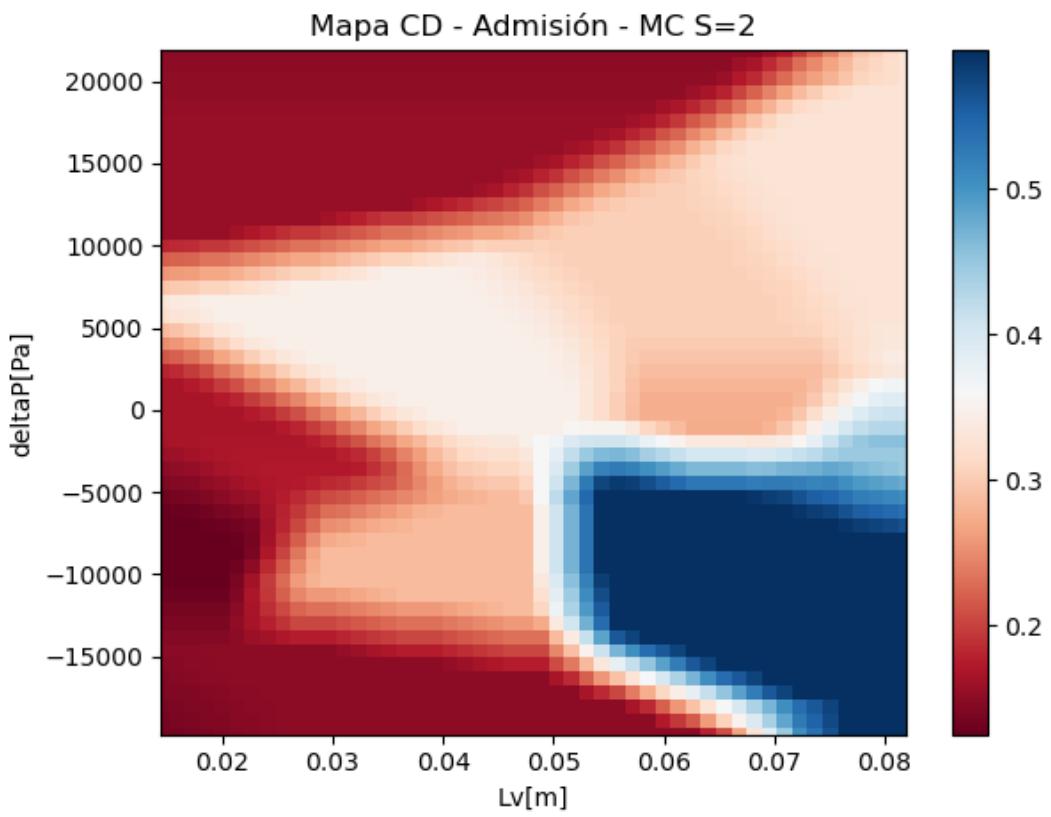


Figura 4.8. Puerto de admisión

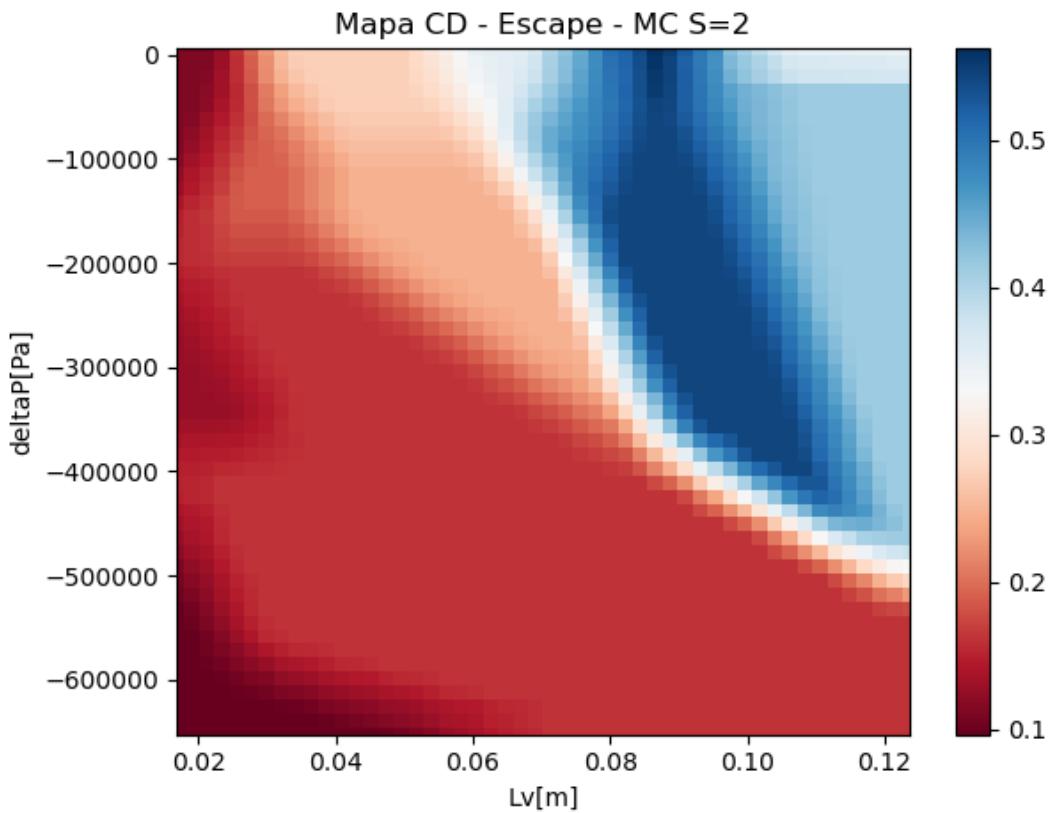
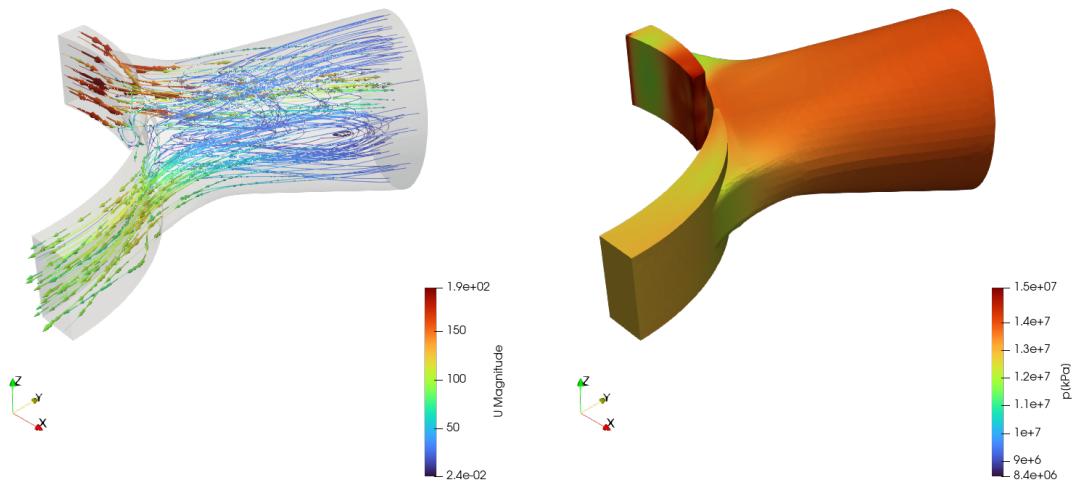
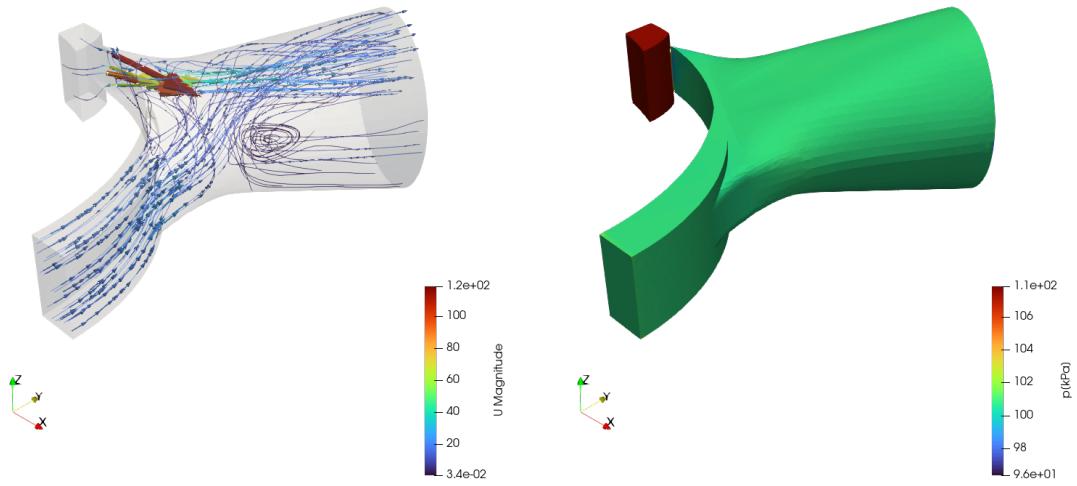
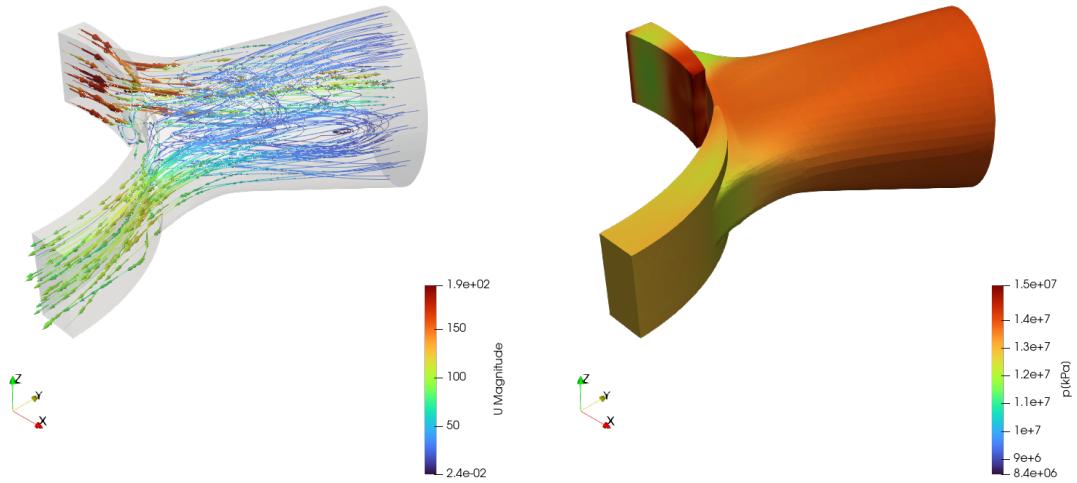


Figura 4.9. Puerto de escape

Figura 4.10. Admisión - Valor máximo de  $C_D$ 

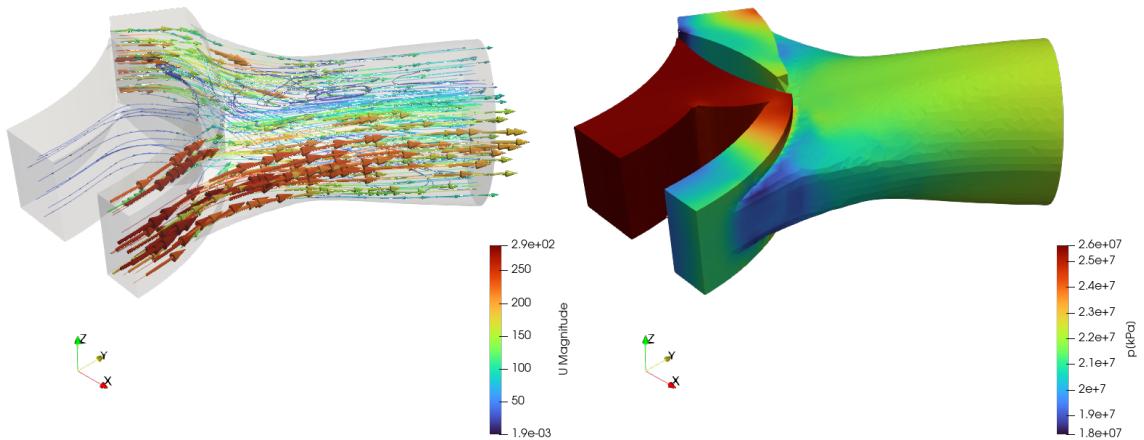
#### 4.4 Segunda iteración y resultado final

En la segunda iteración se utilizó el mapa de  $C_D$  para la admisión y escape como dato de entrada de ICESym, con esto se realizó una serie de corridas de optimización con el

Figura 4.11. Admisión - Valor mínimo de  $C_D$ Figura 4.12. Admisión - Valor máximo de  $\dot{m}$ 

algoritmo genético, de las cuales se seleccionaron los mejores candidatos. Se obtuvieron 3 candidatos principales, indicados como  $run_{34}$ ,  $run_{38}$ ,  $run_{51}$  cuyas geometrías se indican en la tabla 4.3, se ve que los diámetros son similares y que la mayor variación se da en los largos de los conductos de admisión y escape. Exceptuando la corrida  $run_{51}$  los ángulos de apertura de los puertos de admisión se mantienen cercanos

figura ???. Para determinar cuál de todos es el más prometedor, se compararon las curvas de presión, torque y potencia, las cuales se muestran en la figura 4.18

Figura 4.13. Escape - Valor máximo de  $C_D$ 

Corrida	DTA	DTE	LIT	LET	IIA	IFA	EIA	EFA
-	mm	mm	m	m	gra	gra	gra	gra
run 34	83,2	100	0,6839	1,2323	5,81	52,26	81,29	8,71
run 38	83,2	96,1	1,1226	1,1226	0	52,26	87,1	8,71
run 51	84,5	81,9	0,6839	0,3548	17,42	55,16	66,77	37,74

Tabla 4.3. Geometrías de segunda iteración

El motor tiene una potencia máxima de 117 CV a las 6500 RPM y un par máximo de 177Nm a 4000 RPM, este coincide con el máximo de rendimiento volumétrico de  $\sim 0.845$ . En la figura 4.18 se nota los efectos del coeficiente de descarga en la simulación del motor, el máximo

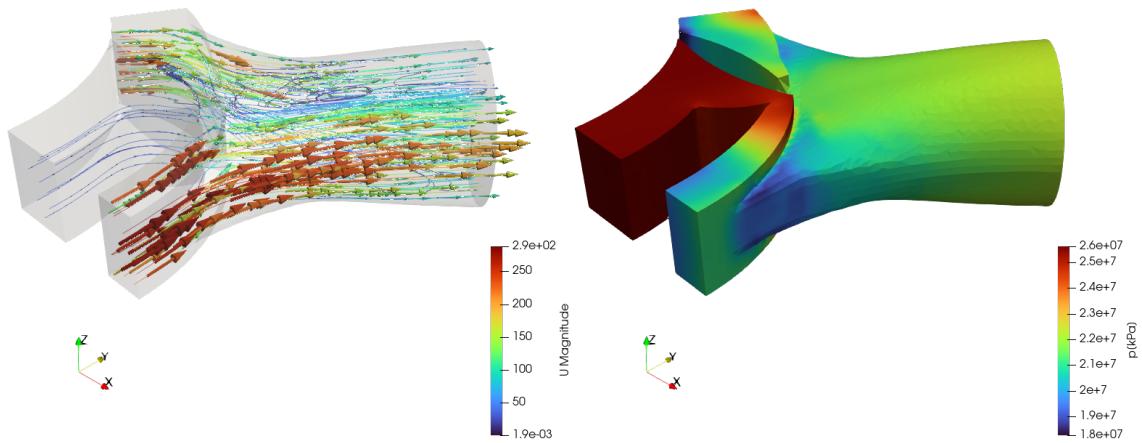


Figura 4.14. Escape - (CAMBIAR POR CD MIN) Valor mínimo de  $C_D$

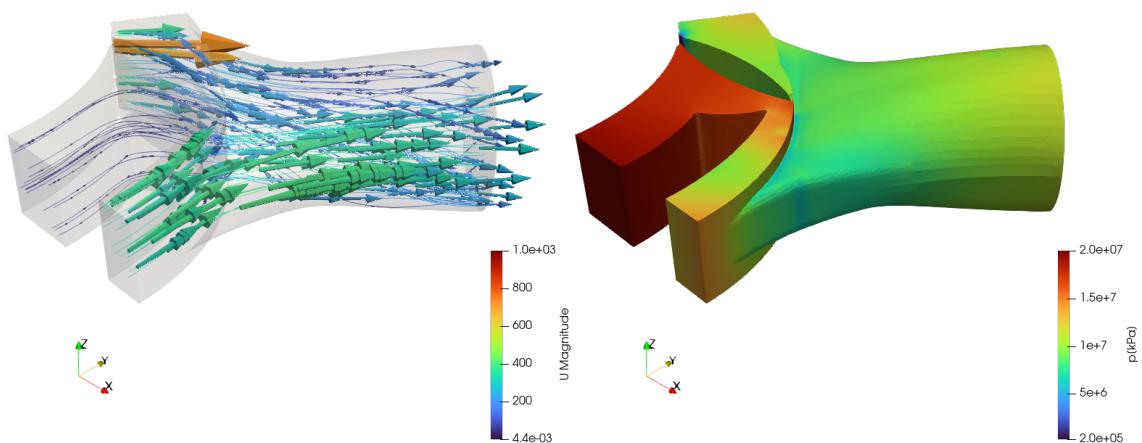


Figura 4.15. Escape - Valor máximo de  $m$

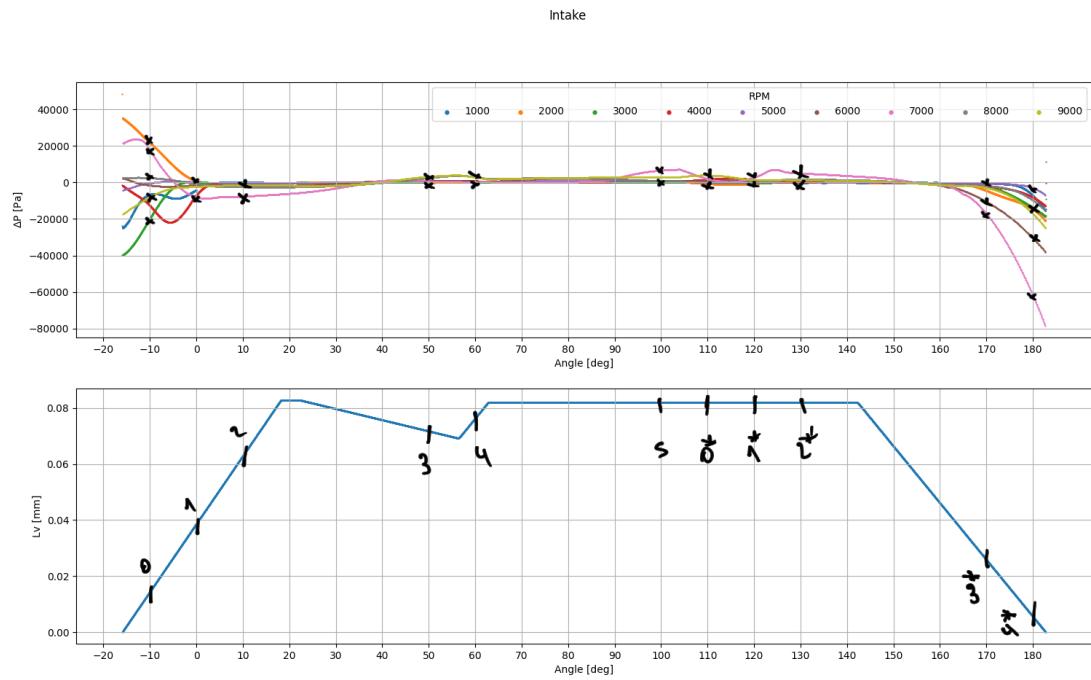


Figura 4.16. Fluojometrías para el puerto de Admisión

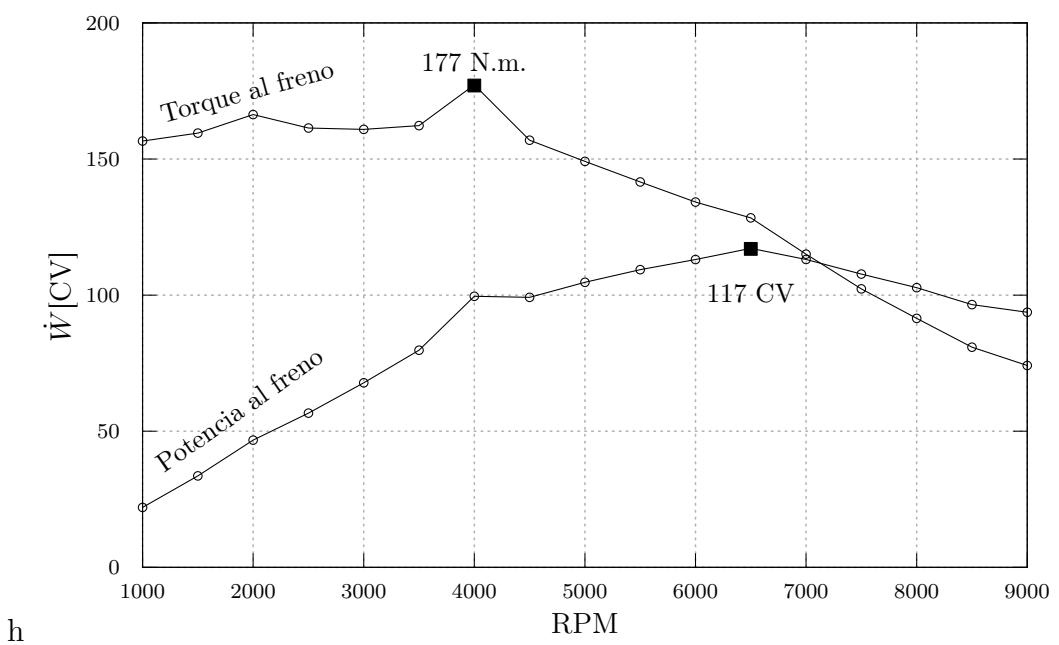


Figura 4.17. Segunda Iteración

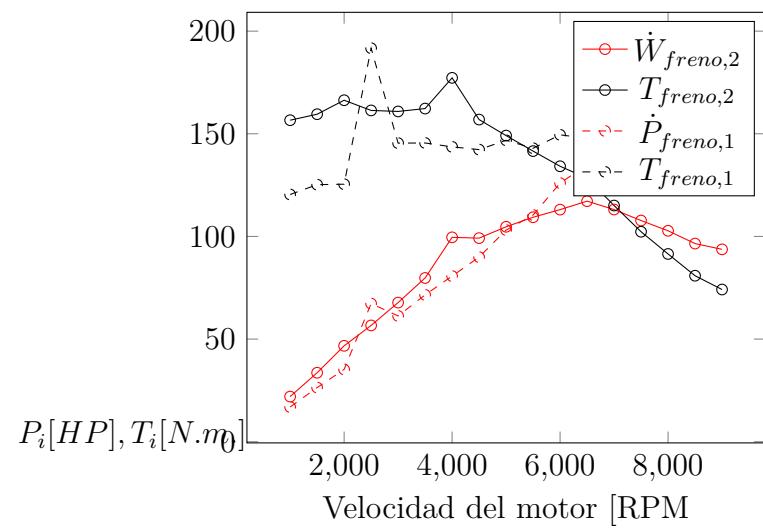


Figura 4.18. Torque y Potencia de Segunda Iteración

## 5. CONCLUSIONES

Se ha obtenido un prediseño de los sistemas de admisión y escape que buscó maximizar el rendimiento volumétrico y reducir la fracción de gases residuales en un rango medio a medio alto de revoluciones del motor, obteniendo una curva de rendimiento volumétrico con una sintonía a 2000 RPM y manteniendo valores de  $\eta_v$  cercanos al 70% para 6000 a 7000 RPM. Además, se obtuvo un mapa de  $C_D$  que modeliza el funcionamiento de los puertos con apertura de puerto y diferencia de presión como variables.

Junto con estos resultados se desarrolló un conjunto de *scripts* que permiten utilizar el simulador ICESym como una *caja negra*, pudiendo configurar, ejecutar y leer los resultados de una simulación, esto permite utilizar el simulador acoplado a otro programa.

Como trabajos a futuro se tiene la incorporación de los modelos de fricción obtenidos en trabajos anteriores([Roldán, 2020](#)) a ICESym, la creación de un optimizador genético híbrido, es decir, que permita utilizar algoritmos genéticos para determinar los puntos más interesantes del dominio evaluado para un problema dado y el uso de técnicas directas para encontrar el valor del óptimo buscado.

## 6. REFERENCIAS

- Fortin, ". F.-A., De Rainville, F.-M., Gardner, M.-A., Parizeau, M., & ", C. G. (2012). DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy. *Journal of Machine Learning Research*, 13, 2171-2175.
- Foundation, T. O. (s.f.). *OpenFOAM* (Ver. 8) [OpenFOAM: The open source CFD toolbox.]. <https://openfoam.org/>
- Goldberg. (1989). *Genetic Algorithms, in Search, Optimization & Machine Learning* (1<sup>a</sup> ed.). Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Heywood. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (Second Edition). McGraw-Hill Education.
- Keea, R. (1991). The Chemkin Thermodynamic Data Base.
- Launder, S. (1974). The numerical computation of turbulent flows.
- López, Cañón, W., & Nigro. (2013). Simulación computacional del ciclo operativo y curvas características de un motor de combustión interna rotativo de avanzada. *XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBIM 2013*.
- López, Cañón, W., & Sarraf. (2016). A constant-pressure model for the overlap of chambers in rotary internal combustion engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Volume 138, Issue 11*.
- Montorfano, P. (2015). SnappyHexMesh: scalable & automatic mesh generation for OpenFOAM. [https://hpc-forge.cineca.it/files/CoursesDev/public/2015/Workshop\\_HPC\\_Methods\\_for\\_Engineering/snappyHexMesh.pdf](https://hpc-forge.cineca.it/files/CoursesDev/public/2015/Workshop_HPC_Methods_for_Engineering/snappyHexMesh.pdf)
- Nigro, López, Gimenez, Pairetti & Chialvo. (s.f.). *ICESym: An Internal Combustion Engine Simulator*. [Copyright ©2010-2020.]. <https://github.com/jmarcelogimenez/icesym>
- Open Cascade, C., EDF. (s.f.). *Salome* [The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation]. <https://salome-platform.org/>
- Raine, R. R. (2000). ISIS 319 User Manual.

- Roldán, Á. (2020). Simulación Comptuacional del comportamiento dinámico de los sellos de estanqueidad del motor rotativo de combustión a volumen constante (MRCVC).
- Shi, Y., Ge, H.-W., & Reitz. (2011). *Computational Optimization of Internal Combustion Engines* (1<sup>a</sup> ed.). Springer.
- Shkolnik, N. S. A. C. (2005). High Efficiency Hybrid Cycle Engine. *ASME 2006 Internal Combustion Engine Division Spring Technical*.
- Team, T. F. (s.f.). *FreeCAD*. <https://www.freecadweb.org/>
- Toth. (2004). *Motor Rotativo de Combustión a volumen Constante (MRCVC)* (Patente Res. N° AR004806B1, Rec. N° P19960105411).
- Wilcox. (2006). *Turbulence Modeling for CFD* (3<sup>a</sup> ed.). D C W Industries; 3rd edition (November 1, 2006).

## **7. ANEXO I**

A continuación se dejan las tablas con los datos de coeficientes de descarga para el puerto de admisión y escape del motor resultante de la primer optimización.

Caso	Flujo	RPM	$\theta$	Cig.	$\dot{m}$	$l_v$	$\Delta P$	$C_D$	$P_0$	$P_T$	Flujo	$\gamma$	$M_M$	$C_P$	$C_V$	$R_{gas}$	$A_{ref}$	$A_{eff}$
			[grad]	[ $\frac{kg}{seg}$ ]	[mm]	[Kpa]	[·]	[Kpa]	[Kpa]	Bloq.		[ $\frac{g}{mol}$ ]	[ $\frac{kJ}{kmolK}$ ]	[ $\frac{kJ}{kmolK}$ ]	[ $\frac{cm^2}{kmolK}$ ]	[ $cm^2$ ]	[ $cm^2$ ]	
1	C	7000	10	-122,09	62,95	-7,37	0,5952	125,49	118,12	No	1,32	28,37	1121,43	846,63	293,07	18,51	11,02	
1	C	1000	110	-12,22	81,94	-0,09	0,50306	100,87	100,78	No	1,31	28,37	1164,49	889,7	293,07	24,09	12,12	
1	C	2000	110	-32,97	81,94	-0,57	0,44822	109,38	108,81	No	1,33	28,37	1112,38	837,59	293,07	24,09	10,8	
1	C	7000	110	37,17	81,94	1,57	0,35645	88,75	87,18	No	1,32	28,37	1128,41	853,62	293,07	24,09	8,59	
1	I	2000	0	15,15	38,69	0,78	0,34614	111,46	110,68	No	1,34	28,37	1090,33	815,54	293,07	11,38	3,94	
1	C	7000	120	50,47	81,94	2,62	0,34332	100,99	98,37	No	1,33	28,37	1117,72	842,93	293,07	24,09	8,27	
1	C	7000	130	70,5	81,94	4,95	0,32874	118,12	113,16	No	1,32	28,37	1121,43	846,63	293,07	24,09	7,92	
1	I	2000	120	-22,68	81,94	-0,47	0,31572	111,93	111,46	No	1,34	28,37	1090,33	815,54	293,07	24,09	7,61	
1	I	9000	50	51,48	71,76	4,09	0,30448	111,04	106,95	No	1,33	28,37	1114,72	839,93	293,07	21,1	6,42	
1	C	3000	110	17,75	81,94	0,52	0,29566	98,56	98,04	No	1,31	28,37	1152,37	877,58	293,07	24,09	7,12	
1	C	7000	0	-34,26	38,69	-7,69	0,28521	108,68	100,99	No	1,33	28,37	1117,72	842,93	293,07	11,38	3,24	
1	C	7000	50	34,78	71,76	1,75	0,27575	142,14	140,38	No	1,33	28,37	1117,22	842,43	293,07	21,1	5,82	
1	C	3000	50	19,85	71,76	0,69	0,27394	108,62	107,93	No	1,33	28,37	1102,5	827,71	293,07	21,1	5,78	
1	I	1000	100	4,95	81,94	0,04	0,25877	103,77	103,73	No	1,33	28,37	1111,03	836,24	293,07	24,09	6,23	
1	I	9000	170	-10,36	25,83	-3,69	0,17593	114,73	111,04	No	1,33	28,37	1114,72	839,93	293,07	7,59	1,34	
1	C	3000	170	-8,01	25,83	-2,34	0,16662	110,96	108,62	No	1,33	28,37	1102,5	827,71	293,07	7,59	1,27	
1	C	7000	590	8,6	14,43	18,08	0,15563	88,75	70,67	No	1,32	28,37	1128,41	853,62	293,07	4,24	0,66	
1	C	7000	170	-21,77	25,83	-18,15	0,14922	160,29	142,14	No	1,33	28,37	1117,22	842,43	293,07	7,59	1,13	
1	C	2000	590	10,43	14,43	21,86	0,14808	108,81	86,95	No	1,33	28,37	1112,38	837,59	293,07	4,24	0,63	
1	C	3000	590	-8,71	14,43	-19,74	0,13499	118,29	98,56	No	1,31	28,37	1152,37	877,58	293,07	4,24	0,57	
1	C	10000	590	-4,64	14,43	-6,57	0,12536	107,36	100,78	No	1,31	28,37	1164,49	889,7	293,07	4,24	0,53	

Tabla 7.1. Mapa de  $C_d$  del puerto de Admisión

Caso	Flujo	RPM	$\theta$	Cig.	$\dot{m}$	$l_v$	$\Delta P$	$C_D$	$P_0$	$P_T$	Flujo	$\gamma$	$M_M$	$C_P$	$C_V$	$R_{gas}$	$A_{ref}$	$A_{eff}$
		[grad]	[deg]		[mm]	[Kpa]	[Kpa]		[Kpa]	Bloq.			[ $\frac{g}{m \cdot \text{at}} \frac{kJ}{kmol \cdot K}$ ]	[ $\frac{kJ}{kmol \cdot K}$ ]	[ $\frac{cm^2}{kmol \cdot K}$ ]	[ $\frac{cm^2}{kmol \cdot K}$ ]	[ $\frac{cm^2}{kmol \cdot K}$ ]	
1	C	9000	440	-145,04	87,76	-10,72	0,57686	160,07	149,35	No	1,26	28,37	1330,46	1055,67	293,07	25,8	14,88	
1	C	9000	560	-83,33	75,75	-5,17	0,55106	154,52	149,35	No	1,26	28,37	1330,46	1055,67	293,07	22,27	12,27	
1	C	7000	560	-99,97	75,75	-11,79	0,48497	118,29	106,49	No	1,27	28,37	1307,9	1033,1	293,07	22,27	10,8	
1	C	4000	540	-76,15	76,37	-5,71	0,46505	156,47	150,76	No	1,26	28,37	1328,74	1053,94	293,07	22,45	10,44	
1	C	8000	540	-145,11	76,37	-17,09	0,46308	249,29	232,2	No	1,28	28,37	1250,09	975,3	293,07	22,45	10,4	
1	C	7000	530	-145,67	96,64	-18,26	0,45062	166,99	148,74	No	1,29	28,37	1224,49	949,7	293,07	28,41	12,8	
1	C	7000	440	-176,13	87,76	-33,42	0,44552	139,91	106,49	No	1,27	28,37	1307,9	1033,1	293,07	25,8	11,5	
1	C	2000	530	-74,49	96,64	-3,64	0,44496	168,44	164,79	No	1,26	28,37	1328,82	1054,03	293,07	28,41	12,64	
1	C	4000	530	-91,54	96,64	-6,68	0,43957	154,23	147,54	No	1,26	28,37	1316,84	1042,05	293,07	28,41	12,49	
1	C	3000	500	-19,84	123,6	-0,21	0,43741	89,41	89,2	No	1,28	28,37	1252,45	977,66	293,07	36,34	15,89	
1	C	8000	530	-91	96,64	-6,68	0,43698	154,23	147,54	No	1,26	28,37	1316,84	1042,05	293,07	28,41	12,42	
1	C	1000	500	-12,91	123,6	-0,07	0,43572	93,55	93,48	No	1,29	28,37	1212,19	937,4	293,07	36,34	15,83	
1	C	7000	500	-85,34	123,6	-3,27	0,41425	159,66	156,39	No	1,26	28,37	1327,18	1052,39	293,07	36,34	15,05	
1	C	7000	525	-101,43	106,77	-9,61	0,41325	144,92	135,31	No	1,3	28,37	1192,21	917,42	293,07	31,39	12,97	
1	C	9000	525	-54,46	106,77	-3,23	0,41192	119,08	115,85	No	1,3	28,37	1194,18	919,39	293,07	31,39	12,93	
1	C	2000	525	-70,28	106,77	-3,3	0,40892	174,81	171,51	No	1,27	28,37	1303,11	1028,31	293,07	31,39	12,84	
1	C	2000	550	-8,38	71,76	-0,13	0,35827	123,78	123,65	No	1,27	28,37	1290,7	1015,91	293,07	21,1	7,56	
1	C	2000	430	67,5	0,01	0,35305	123,65	123,64	No	1,27	28,37	1290,7	1015,91	293,07	19,84	7,01		
1	C	4000	420	-79,67	47,23	-49,34	0,27448	200,1	150,76	No	1,26	28,37	1328,74	1053,94	293,07	13,89	3,81	
1	C	8000	420	-117,42	47,23	-109,35	0,24676	341,55	232,2	No	1,28	28,37	1250,09	975,3	293,07	13,89	3,43	
1	C	1000	525	51,16	106,77	5,72	0,22448	141,34	135,61	No	1,26	28,37	1312,7	1037,91	293,07	31,39	7,06	
1	C	8000	500	2,39	123,6	0,02	0,20251	74,72	74,7	No	1,27	28,37	1274,81	1000,02	293,07	36,34	7,36	
1	C	8000	410	-65,86	26,96	-237,72	0,197	385,27	147,54	Sí	1,26	28,37	1316,84	1042,05	293,07	7,93	1,56	
1	C	2000	410	-47,62	26,96	-11,7	0,19007	281,79	164,79	No	1,26	28,37	1328,82	1054,03	293,07	7,93	1,51	
1	C	4000	410	-54,02	26,96	-237,72	0,16158	385,27	147,54	Sí	1,26	28,37	1316,84	1042,05	293,07	7,93	1,28	
1	C	7000	410	-85,11	26,96	-496,51	0,16044	645,25	148,74	Sí	1,29	28,37	1224,49	949,7	293,07	7,93	1,27	
1	C	2000	405	-29,39	16,83	-263,8	0,12654	435,31	171,51	Sí	1,27	28,37	1303,11	1028,31	293,07	4,95	0,63	
1	C	1000	405	-16,36	16,83	-100,33	0,11239	241,67	141,34	No	1,26	28,37	1312,7	1037,91	293,07	4,95	0,56	
1	C	9000	405	-31,33	16,83	-513,57	0,09782	629,42	115,85	Sí	1,3	28,37	1194,18	919,39	293,07	4,95	0,48	
1	C	7000	405	-38,62	16,83	-652,9	0,09631	788,21	135,31	Sí	1,3	28,37	1192,21	917,42	293,07	4,95	0,48	

Tabla 7.2. Mapa de  $C_D$  del puerto de escape