

**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

1 INTRODUCCIÓN	1
2 MARCO TEÓRICO	5
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	13
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	17
2.1.10 Propiedades termodinámicas de mezclas aire-combustible	20
2.2 Geometría y Ciclo Operativo del MRCVC	23
2.2.1 Sistemas de intercambio de gases	24
2.3 Flujo metrías y CFD	26
2.3.1 Modelos de turbulencia	27
2.3.2 Condiciones Iniciales	29
2.3.3 Malla	31
2.3.4 Coeficiente de descarga C_D	31
3 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	34
3.1 Internal Combustion Engine Simulator	34
3.2 Modificaciones a ICESym	34
3.2.1 Flujo a través de los puertos	34
3.2.2 Área de referencia	38
3.2.3 Interfaz con optimizador	41

3.3 Optimizador y Algoritmo Genético	44
3.3.1 Población	46
3.3.2 Reproducción	47
3.3.3 Cruza	48
3.3.4 Mutación	48
3.3.5 Función objetivo	50
3.4 OpenFOAM	54
3.4.1 Pre-procesado	55
4 DESARROLLO	63
4.1 Primer Iteración	63
4.2 Modelo de CAD	64
4.3 Flujometrías	66
4.3.1 Puerto de Admisión	68
4.3.2 Puerto de Escape	69
4.4 Segunda iteración y resultado final	74
5 CONCLUSIONES	77
6 REFERENCIAS	78
7 ANEXO I	80

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	20
2.8	Variación del volúmen del MRCVC	24
2.9	Ciclo operativo del MRCVC	25
2.10	Ciclo operativo del MRCVC	26
2.11	Esquema del sistema de intercambio de gases	26
2.12	Puerto de escape	27
2.13	Solape de cámaras	29
2.14	Área de referencia	33
3.1	Interpolación bilineal de $\sin(\sqrt{x^2 + y^2})$	37
3.2	Comparación de interpolaciones	40
3.3	Representación del individuo	47
3.4	Cruza de dos puntos	48
3.5	Curvas de rendimiento volumétrico aserradas	50
3.6	Presión en función de la apertura el puerto, $\Delta P = f(l_v)$	56
3.7	Puerto de admisión $\theta = 50^\circ$ Modelado con FreeCAD	57
3.8	Malla hermética	58
3.9	Nombres de Nombres de Parches	59
3.10	Diferentes mallas para flujometrías	60
3.11	Esquema de directorios OpenFOAM	61

3.12 Malla de blockMesh y stl de Salome	61
3.13 Pasos de SnappyHexMesh(Montorfano, 2015)	62
4.1 Primer Iteración	65
4.2 Torque y Potencia de Primer Iteración	66
4.3 CAD Primer Iteración	67
4.4 CAD Primer iteración (vistas fuera de escala).	67
4.5 Flujometrías puerto de admisión	68
4.6 Flujometrías puerto de escape	69
4.7 Puerto de admisión 10° 7000RPM	70
4.8 Puerto de admisión	70
4.9 Admisión - Valor máximo de C_D	71
4.10 Admisión - Valor mínimo de C_D	71
4.11 Admisión - Valor máximo de \dot{m}	72
4.12 Puerto de escape	72
4.13 Escape - Valor máximo de C_D	73
4.14 Escape - (CAMBIAR POR CD MIN) Valor mínimo de C_D	73
4.15 Escape - Valor máximo de \dot{m}	74
4.16 Segunda Iteración	75
4.17 Comparativa de Torque y potencia al freno	76

Índice de tablas

2.1	Geometría del MRCVC	24
3.1	Parámetros que representan al motor	47
3.2	Configuración de mallas mostradas en la figura 3.10	57
4.1	Configuración utilizada.	64
4.2	Geometría del mejor candidato	65
4.3	Geometrías de segunda iteración	75
7.1	Mapa de C_d del puerto de Admisión	81
7.2	Mapa de C_D del puerto de escape	82

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

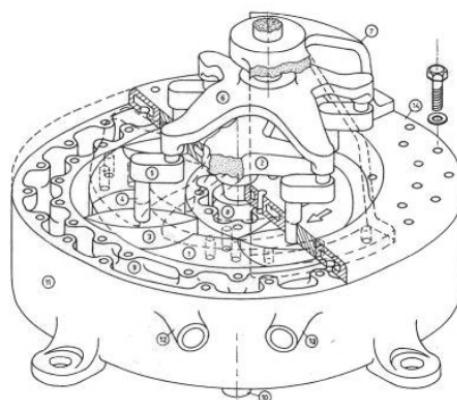


Figura 1.1. Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante

a 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 y 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 haciendo énfasis en 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 de los puertos. No se repara en detalles como la forma de la transición entre las paredes del puerto hacia la cámara de combustión, el ángulo 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 la periferia del motor. Este modelo 3D se utilizó para extraer la geometría a simular con OpenFOAM y realizar flujometrías de las que se obtiene un valor flujo másico (\dot{m}) en estado estacionario para 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 con el objetivo de crear un mapa del coeficiente de descarga que sea función de las variables mencionadas: apertura de puerto y diferencia de presión. Este 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.

Para finalizar el capítulo 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 flujo-metrías, *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, cuando su uso comercial comenzó a popularizarse. La función de estos dispositivos es la de convertir energía potencial del fluido de trabajo (una mezcla de aire-combustible) en trabajo mecánico por medio de un proceso de combustión controlada dentro del cilindro o 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; 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 la revista *Gas Engine*

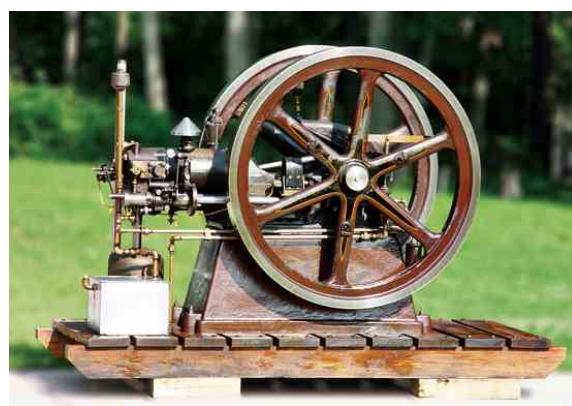


Figura 2.1. Motor 1909 5HP Otto Special Electric Lighting de Wayne Grenning
<https://www.gasenginemagazine.com/gas-engines/1909-5-hp-otto-special-electric/>

*Magazine*¹ ² ³ 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, nivel de ruido, costo de manufactura, tamaño y las emisiones de gases de contaminantes y de efecto invernadero 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 (2.2a) 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. Las carreras de pistón del ciclo Otto son:

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 o 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 denominada *avance de encendido* se enciende la mezcla y comienza la combustión.

Carrera de potencia o expansión La combustión produce un gran 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.

Carrera de escape o barrido Luego de la carrera de expansión, próximo al PMI

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

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

³https://www.youtube.com/watch?v=0d0WZ0H56_U

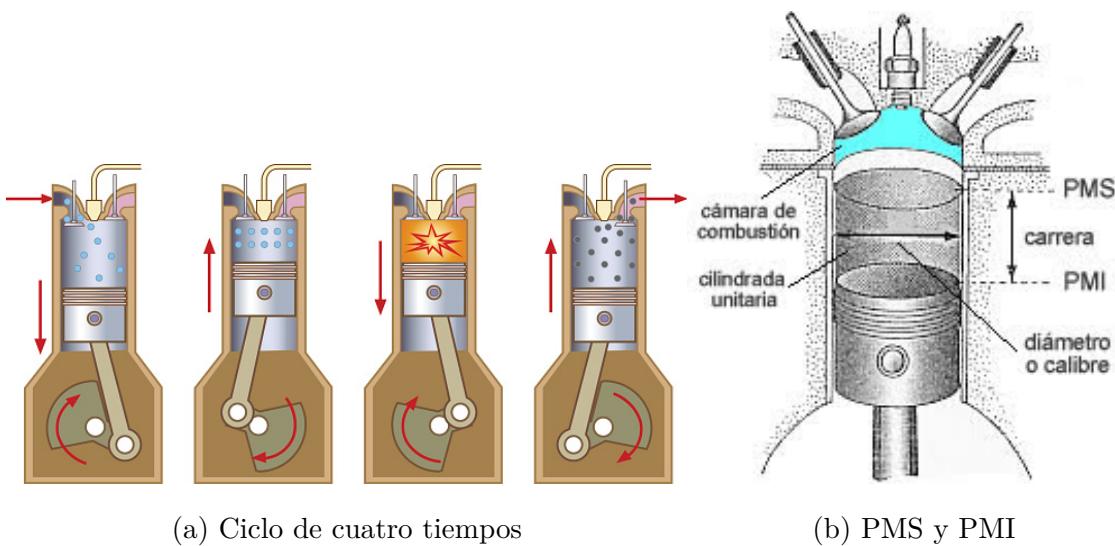


Figura 2.2. Ciclo de cuatro tiempos

se abre la válvula de escape y el movimiento del pistón hacia el PMS produce un barrido de los gases quemados, reiniciando el ciclo.

2.1.1 Motores rotativos

Los motores rotativos son una variable al diseño 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 diseño rotativo más conocido es el Wankel, cuyo primer prototipo funcional se desarrolló cerca del año 1957. Existen 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](#)) y el objeto de este trabajo, el Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante (MRCVC).

Si bien estos motores son una alternativa interesante a los motores reciprocatos, la geometría y aspectos constructivos requiere introducir aceite en la cámara de combustión para lubricar las partes móviles, además tienen una mayor superficie de transferencia de calor causando una mayor pérdida de calor en comparación con los motores reciprocatos. En la actualidad, los requisitos de niveles de emisiones

ambientales de ciertos gases hacen 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 y torque
2. Rango de velocidades de operación
3. Consumo y costo de combustible
4. Costo inicial, de operación y de mantenimiento
5. Confiabilidad
6. Niveles de 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 de combustión, *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 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 Es la diferencia entre el trabajo bruto y neto, 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, en 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* η_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 (*bmep*) y de fricción (*fmeep*), utilizando el valor de potencia correspondiente en la ecuación

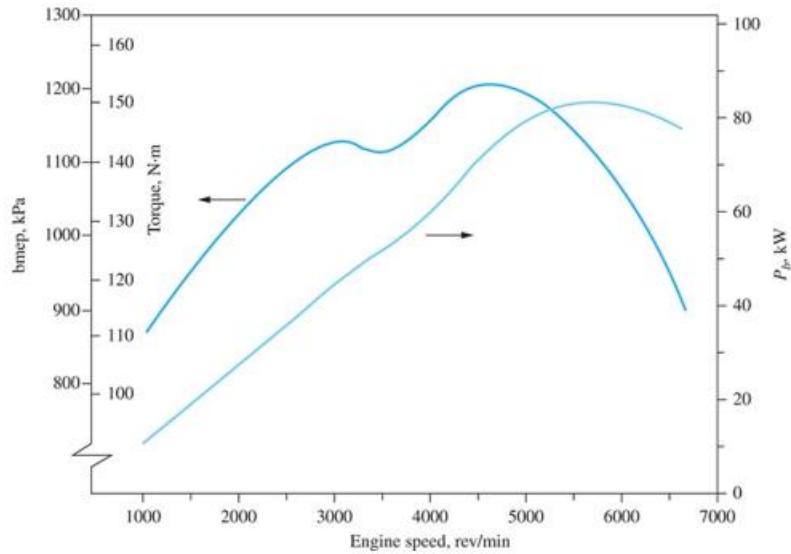


Figura 2.3. *bmepl*, torque y potencia vs velocidad de operación([Heywood, 2018](#)).

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 *bmepl* de motores SI naturalmente aspirados rondan los 1050 kPa 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.

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

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

El valor de rendimiento volumétrico máximo para motores naturalmente aspira-

dos 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 máscico que puede ingresar a la cámara de combustión.

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 trabajo que puede realizar por ciclo de operación. Este indicador es central en la evaluación del desempeño de los sistemas de intercambio de gases y por este motivo es el principal indicador utilizado en este trabajo. En este trabajo se busca 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 entregando potencia a altas RPM además, la curva debe ser preferentemente suave para todo el régimen de funcionamiento del motor.

Estos y otros efectos se describen en detalle en la literatura ([Heywood, 2018](#)), para este trabajo se realizaron las siguientes consideraciones:

1. El combustible utilizado es isooctano, la mezcla aire-combustible es estequiométrica ($\phi = 1$).
2. El sistema de intercambio de gases del MRCVC se compone de un conducto y puerto admisión, conducto y puerto de escape. ICESym tiene en cuenta pérdidas por fricción viscosa en los conductos, los puertos 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 $101330Pa$ y $25^{\circ}C$.
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. La masa residual en la cámara de

combustión es producto de dos efectos, en primer lugar al momento del cierre de la válvula de escape quedan gases residuales de la combustión atrapados en el cilindro y en segundo lugar puede existir un reflujo desde el puerto de escape hacia la cámara de combustión por haber solape de válvulas.

La fracción de gases residuales afecta el rendimiento volumétrico, trabajo obtenido, eficiencia y emisiones.

$$x_r = \frac{m_r}{m} \quad (2.8)$$

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 aumenta la cantidad de gases residuales. Una menor fracción 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.

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 (\dot{m}) que 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 2.9 y en caso de que se cumpla la desigualdad 2.10 el flujo está bloqueado y se utiliza la ecuación 2.11.

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R p_0}{\sqrt{RT_0}} \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{1/\gamma} \left(\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right] \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

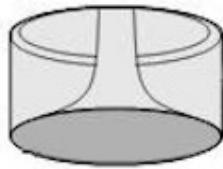


Figura 2.4. Área de cortina

$$\frac{p_T}{p_0} \leq \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.10)$$

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R p_0}{(RT_0)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(2(\gamma-1))} \quad (2.11)$$

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.
- γ , es el cociente de capacidades térmicas del gas.

Las presiones y temperaturas involucradas en el cálculo de \dot{m} 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 .

$$A_R = A_C = \pi D_v l_v \quad (2.12)$$

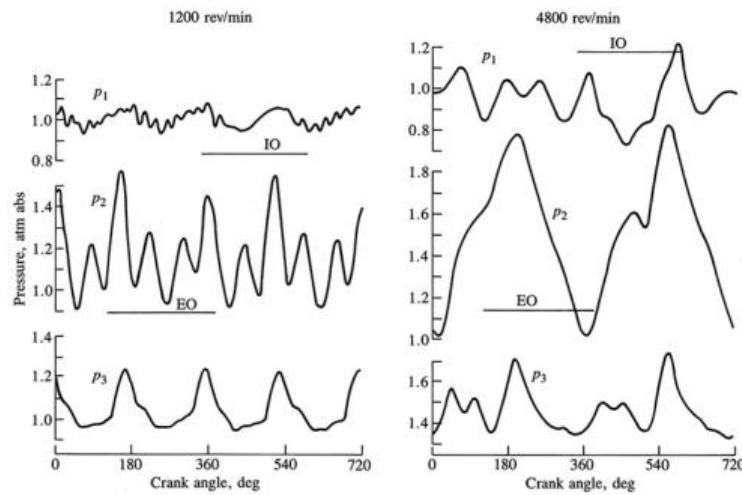


Figura 2.5. (cambiar por una del mrcvc) Diagrama de presión vs ángulo de cigüeñal

2.1.7 Sincronización del sistema de admisión

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 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 sirve el propósito de cámara de resonancia. Se puede ajustar la resonancia de modo que las oscilaciones de presión internas produzcan ondas de sobre presión que alcancen 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 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 en caso de alcanzar el puerto en los instantes previos al cierre del mismo, ayuda a evacuar una mayor cantidad de gas, disminuyendo la fracción de gases residuales.

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.

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 para convertir energía química en trabajo mecánico. Los modelos ideales de ciclos operativos se pueden clasificar según el proceso de combustión en:

1. Volumen constante, fig. 2.6a.

2. Presión constante, fig. 2.6a.
3. Presión limitada (parte a volumen constante y parte a presión constante), fig. 2.6c.

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, la inyección de combustible se realiza directamente en la cámara, cerca del PMS al final de la carrera de compresión. Las condiciones de presión y temperatura dentro de la cámara producen el auto-encendido de la mezcla y el inicio del proceso de combustión.

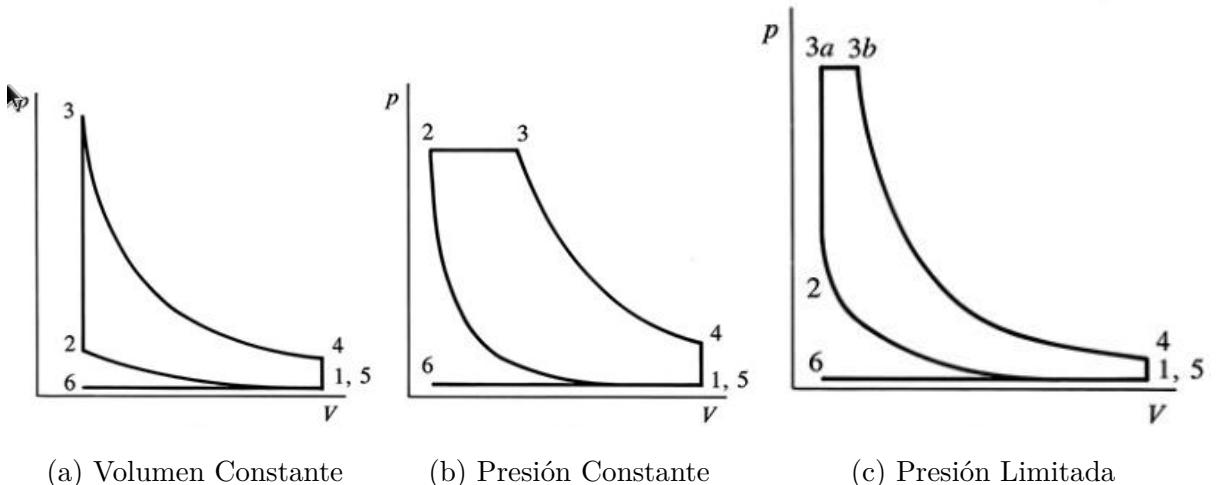


Figura 2.6. Diagramas P-V para ciclos ideales([Heywood, 2018](#))

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 2.8, en la cual se gráfica la variación volumen en función del ángulo del cigüeñal. 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.

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 [2.13](#) y de $imep$ en función de la presión mínima del ciclo p_1 [2.16](#) y máxima p_3 [2.17](#). 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.

$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \left[\frac{\alpha\beta^\gamma - 1}{\alpha\gamma(\beta - 1) + \alpha - 1} \right] \quad (2.13)$$

$$\alpha = \frac{P_3}{P_2} \quad (2.14)$$

$$\beta = \frac{V_{3b}}{V_{3a}} \quad (2.15)$$

$$\frac{imep}{p_1} = \frac{Q^*}{c_v T_1 (\gamma - 1)} \left(\frac{r_c}{r_c - 1} \right) \eta_{f,i} \quad (2.16)$$

$$\frac{imep}{p_3} = \frac{1}{\alpha r_c^\gamma} \left(\frac{Q^*}{c_v T_1} \right) \left(\frac{1}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{r_c}{r_c - 1} \right) \eta_{f,i} \quad (2.17)$$

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 [2.13](#) 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.

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

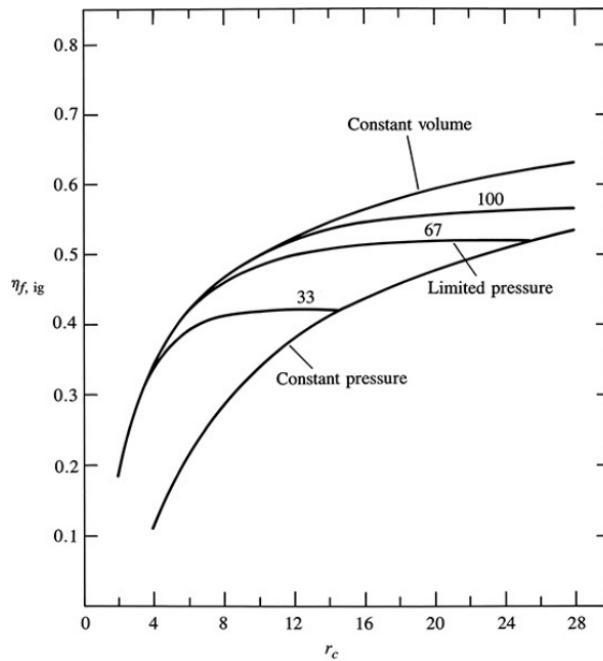


Figure 5.7 Fuel conversion efficiency as a function of compression ratio, for constant-volume, constant-pressure, and limited-pressure ideal gas cycles. $\gamma = 1.3$, $Q^*/(c_v T_1) = 9.3(r_c - 1)/r_c$. For limited-pressure cycle, $p_3/p_1 = 33, 67, 100$.

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

(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

Fue necesario estimar las propiedades termodinámicas de la mezcla para obtener algunas variables utilizadas para calcular las condiciones iniciales del gas en las flujometrías. En lo que respecta a la simulación del ciclo del motor, ICESym contiene rutinas computacionales para calcular el estado termodinámico del fluido de trabajo en el ciclo operativo. En este apartado se detallan las hipótesis y modelos utilizados en las rutinas computacionales para el cálculo de las propiedades termodinámicas de las mezclas de aire-combustible quemadas y sin quemar, para el uso en las condiciones iniciales requeridas en las flujometrías.

En la simulación del MRCVC se utilizó una mezcla estequeométrica ($\phi = 1$) de aire-isooctano C_8H_{18} cuya reacción (estequeométrica) se indica en la ecuación 2.18.



Expresando el combustible de manera genérica con C_aH_b o en función de la cantidad de moles de carbono del combustible CH_y con $y = \frac{b}{a}$, se puede expresar la proporción estequeométrica de aire combustible que se requiere con la ecuación 2.19.

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \left(\frac{F}{A}\right)^{-1}_s = \frac{34.56(4+y)}{12.011 + 1.008y} \quad (2.19)$$

Otro número importante es la relación de equivalencia ϕ , que se calcula con el cociente entre la relación molar real y estequeométrica de una mezcla, ver ecuación 2.20

$$\phi = \frac{(F/A)_{real}}{(F/A)_s} \quad (2.20)$$

Las rutinas computacionales utilizadas para calcular las propiedades termodinámicas de las mezclas aire-combustible 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 de la mezcla a temperatura estándar $T(K)$ y 1 atmósfera de presión se aproxima el calor específico a presión constante $\widetilde{c}_{p,i}$ por la ecuación 2.21, la entalpía estándar \widetilde{h}_i por la ecuación 2.22 y la entropía estándar \widetilde{s}_i por la ecuación 2.23.

$$\frac{\widetilde{c}_{p,i}}{T} = a_{i1} + a_{i2}T + a_{i3}T^2 + a_{i4}T^3 + a_{i5}T^4 \quad (2.21)$$

$$\frac{\tilde{h}_i}{\tilde{R}T} = a_{i1} + \frac{a_{i2}}{2}T + \frac{a_{i3}}{3}T^2 + \frac{a_{i4}}{4}T^3 + \frac{a_{i5}}{5}T^4 + \frac{a_{i6}}{T} \quad (2.22)$$

$$\frac{\tilde{s}_i}{\tilde{R}} = a_{i1} \ln T + a_{i2}T + \frac{a_{i3}}{2}T^2 + \frac{a_{i4}}{3}T^3 + \frac{a_{i5}}{4}T^4 + a_{i6} \quad (2.23)$$

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 μ , calor específico a presión constante C_P , gamma γ y el número de Prandtl P_R , ya que todos estos valores son requeridos para obtener las condiciones iniciales de las flujometrías.

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 2.24. La viscosidad μ 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 2.25. Del mismo modo, el número de Prantl de productos de la combustión de hidrocarburos y aire se puede estimar en función del γ de la mezcla, para $\phi \leq 1$ con la ecuación 2.26

$$M_m = \sum_i M_i x_i \quad (2.24)$$

$$\mu_{productos} = \frac{\mu_{aire}}{1 + 0.027\phi} = \frac{3.3 \times 10^{-7}T^{0.7}}{1 + 0.027\phi} \quad (2.25)$$

$$Pr = 0.05 + 4.2(\gamma - 1) - 6.7(\gamma - 1)^2 \quad (2.26)$$

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 (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 ocurra casi en su totalidad a volumen constante, como se observa en la figura 2.8 y 2.9. Este tipo de combustión 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 en comparación a motores de tamaño o cilindrada similar. Esta combinación de rendimiento y potencia que, en principio pueden ser relativamente altos, hace atractivo el desarrollo de este motor.

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 2.10 se puede ver una progresiva del ciclo del MRCVC con estas carreras representadas en azul para la admisión, compresión en amarillo, 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 delimita el frente de la cámara se retrasa con respecto a la cámara con la que inició el ciclo, produciendo que este dure más de 1 revolución resultando en aproximadamente 600° de giro del cigüeñal.

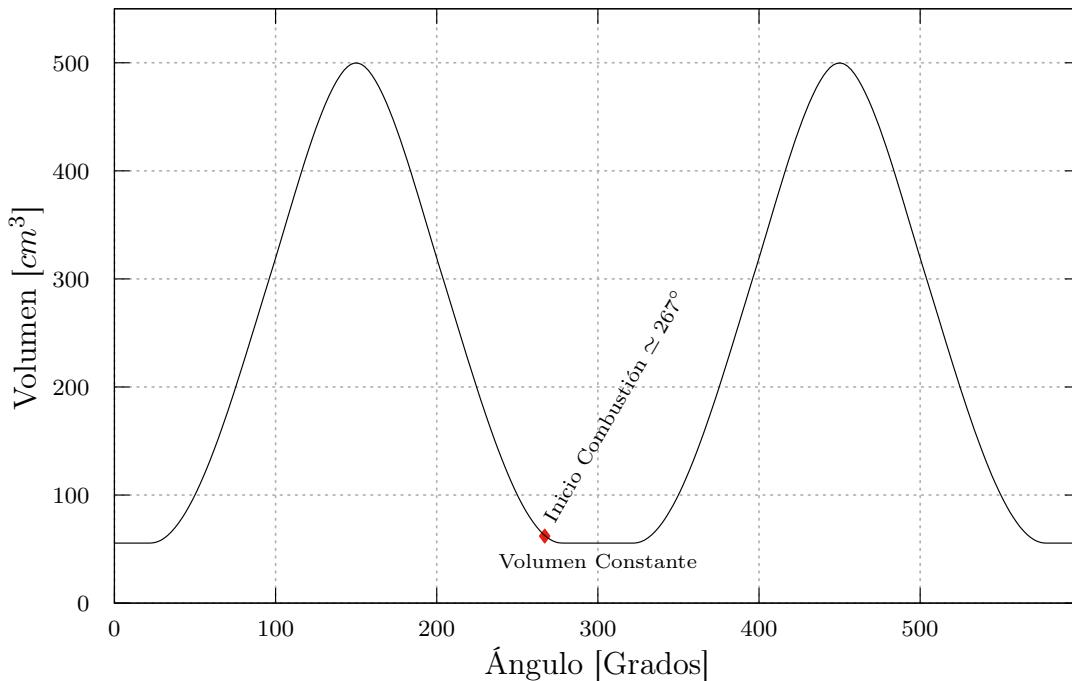


Figura 2.8. Variación del volúmen del MRCVC

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	—	cm ³	mm	mm

Tabla 2.1. Geometría del MRCVC

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 2.8 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, cuerpo de mariposa, puerto y conducto de admisión, puerto y conducto de escape, catalizador y silenciador hasta finalmente descargar en la atmósfera.

Para simplificar el sistema analizado no se tuvieron en cuenta elementos como:

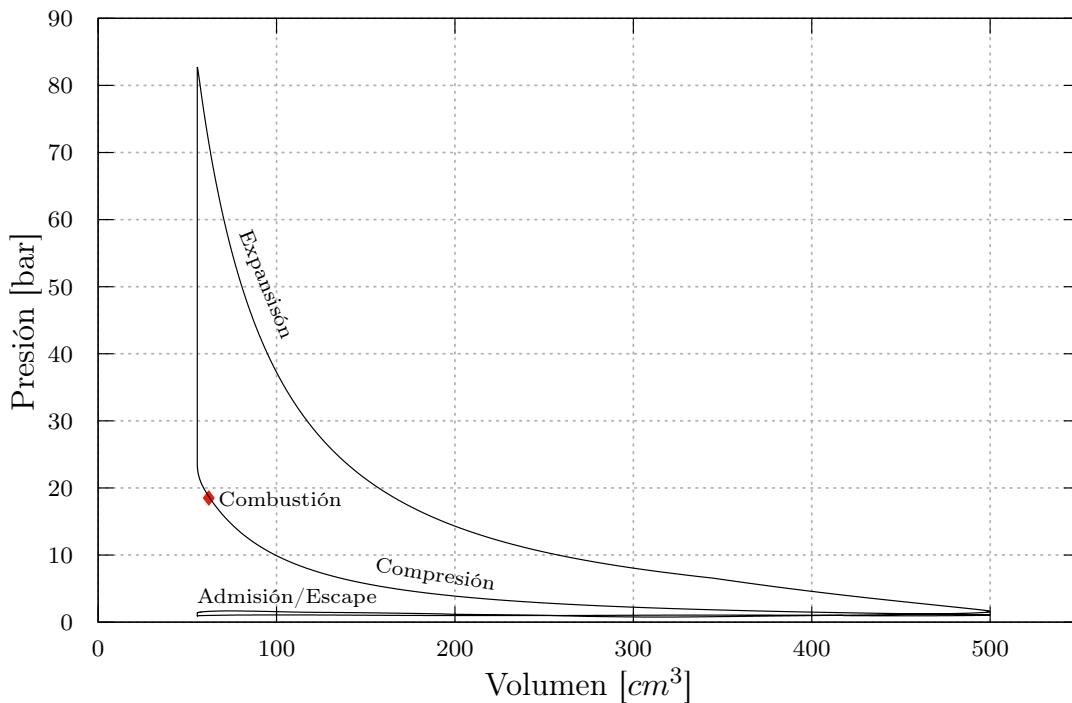


Figura 2.9. Ciclo operativo del MRCVC

mariposa, carburador, filtros de aire, convertidores catalíticos y demás; 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 2.11 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 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*, *IFA* para la admisión y *EIA* y *EFA* para el escape. En la figura 2.12 se indican estos para el puerto de escape.

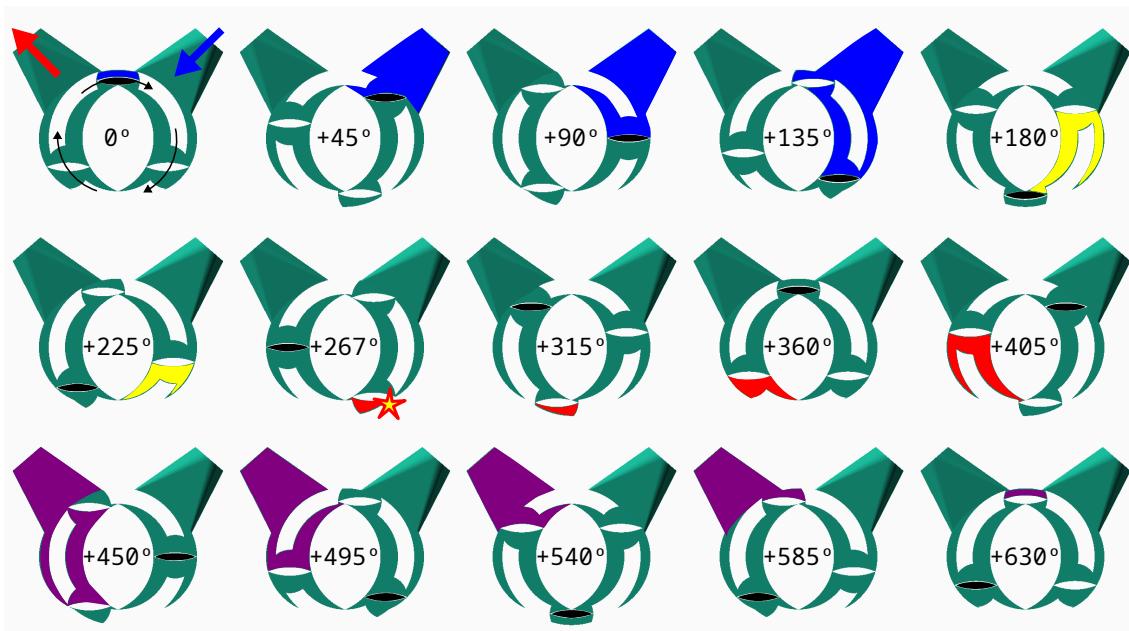


Figura 2.10. Ciclo operativo del MRCVC

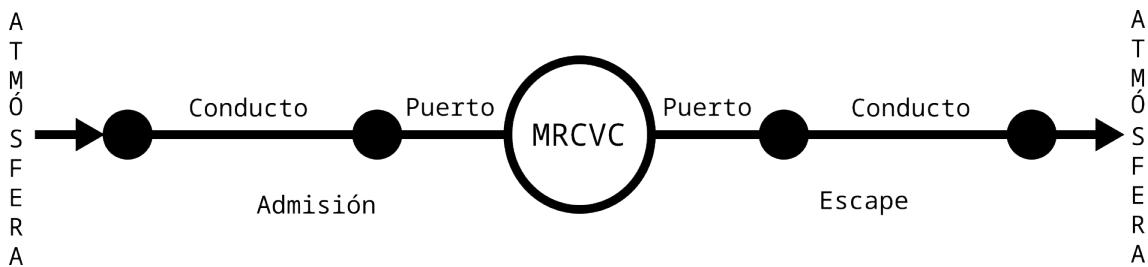


Figura 2.11. Esquema del sistema de intercambio de gases

2.3 Flujometrías y CFD

Se realizó 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 mismo⁴, con el fin de obtener un mapa en función de la presión y la alzada $C_D = f(\Delta P, l_v)$. ICESym requiere de información sobre el C_D para calcular el área efectiva de pasaje de flujo de las válvulas (o puertos en el caso del MRCVC), introduciendo el mapa de C_D se tiene un mejor modelado del funcionamiento del sistema de intercambio de gases porque se conoce la pérdida de carga localizada para un rango de operación del motor.

⁴ICESym utiliza alzada, por lo que se traduce área de puerto en alzada de válvula equivalente.

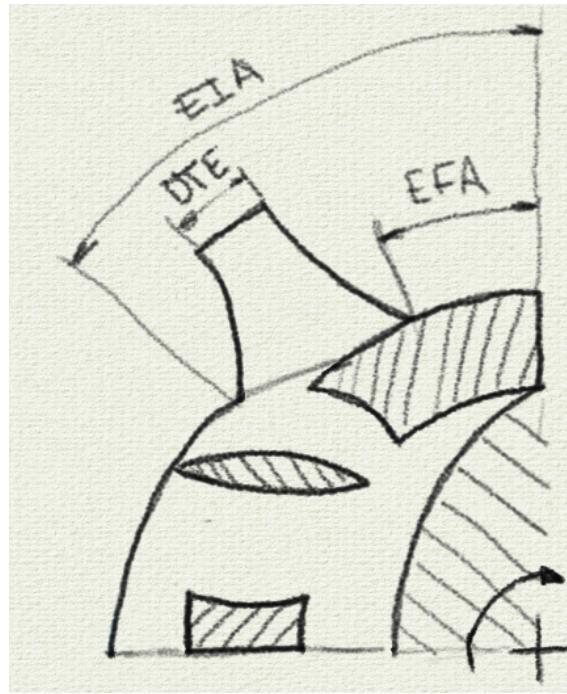


Figura 2.12. Puerto de escape

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 turbulencia de dos ecuaciones $\kappa - \epsilon$ ([Wilcox, 2006](#)), que brinda una ecuación para la *energía cinética turbulenta* κ y otra para la *velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta* ϵ . El modelo está basado en el modelo estándar $\kappa - \epsilon$ ([Launder, 1974](#)) y es uno de los más populares con *performance* conocida, las ecuaciones del modelo son:

$$\frac{D}{Dt}(\rho\kappa) = \nabla \cdot (\rho D_\kappa \nabla \kappa) + P - \rho\epsilon \quad (2.27)$$

Dónde:

- κ es la energía cinética turbulenta en $m^2 s^{-2}$.
- D_κ es la difusividad efectiva para κ .
- P es la velocidad de producción de energía cinética turbulenta en $m^2 s^{-3}$.
- ϵ es la velocidad de disipación de energía cinética turbulenta en $m^2 s^{-3}$.

$$\frac{D}{Dt}(\rho\epsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) \frac{C_1 \epsilon}{\kappa} \left(P + C_3 \frac{2}{3} \kappa \nabla \cdot u \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (2.28)$$

Dónde:

- D_ϵ es la difusividad efectiva de ϵ .
- C_1 es un coeficiente del modelo.
- C_2 es un coeficiente del modelo.

La ecuación para la viscosidad turbulenta ν_t es

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (2.29)$$

Dónde:

- C_μ es un coeficiente del modelo.
- ν_t es la viscosidad turbulenta en $m^2 s^{-1}$.

Los coeficientes por defecto del modelo son

$$C_{\epsilon 1} = 1.44 \quad C_{\epsilon 2} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (2.30)$$

El valor inicial para κ se puede estimar con:

$$\kappa = \frac{3}{2} (|u_{ref}| \cdot I)^2 \quad (2.31)$$

Dónde:

- I es la intensidad de turbulencia en %.
- u_{ref} es una velocidad de referencia en ms^{-1} .

El valor inicial para ϵ se puede estimar con:

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot \kappa^{3/2}}{l_m} \quad (2.32)$$

Dónde:

- C_μ es una constante del modelo que valo 0.09 por defecto

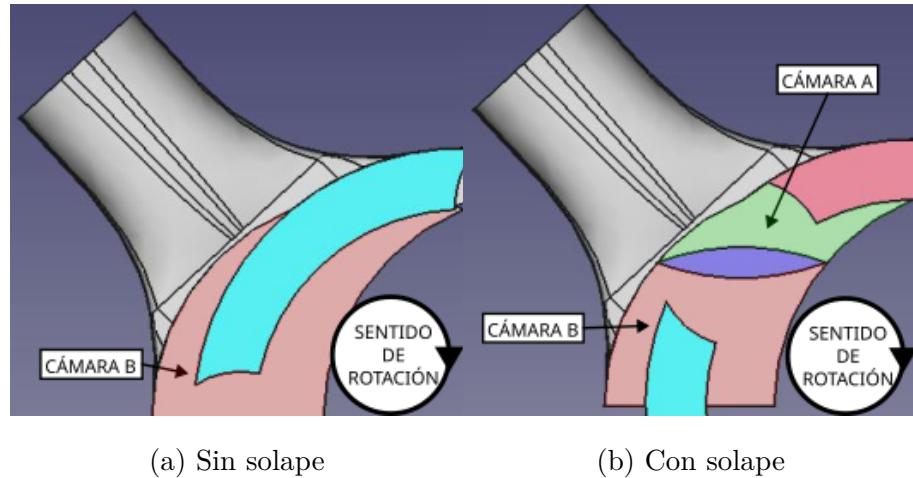


Figura 2.13. Solape de cámaras

- l_m es una longitud de referencia, para flujos internos se estima con el diámetro hidráulico de la cañería, $0.07D_m$.

Las ecuaciones anteriores de κ y ϵ 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 los casos a modelar entre aquellos en los que hay solape de cámaras y los que no (ver figura 2.13), 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 temepratura 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 .

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, los valores calculados son:

- M_M , Masa molar, ec.[2.24](#)
- C_p , Calor específico a presión constante.
- γ , Relación C_p/C_v del gas
- μ , Viscosidad dinámica, ec.[2.25](#)
- ν , Viscosidad cinemática
- P_R , Número de Prandtl, ec.[2.26](#)
- k_{est} , Energía cinética turbulenta, ec.[2.31](#)
- ϵ_{est} , Disipación de la energía cinética turbulenta, ec.[2.32](#)

Para simplificar el análisis no se tuvo en cuenta la fracción de gases residuales, el gas “flujado” es siempre aire limpio en el caso de los puertos de admisión o el gas quemado de una mezcla estequeométrica de aire-combustible en caso de los puertos

de escape, siendo isoctano C_8H_{18} el combustible seleccionado. Las ecuaciones utilizadas para modelar las propiedades termodinámicas de las mezclas aire-combustible fueron descritas brevemente en la 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 3.4.1.2.

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 los resultados de flujometrías con mallas menos refinadas como valor inicial de una malla de mayor refinamiento, esto con el propósito de reducir el tiempo de simulación de las mallas con mayor número de celdas. 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, a su vez este resultado se utiliza como valor inicial de la simulación final con una malla de cubos de 5mm de lado para obtener el valor de \dot{m} utilizado para calcular el C_D .

2.3.4 Coeficiente de descarga C_D

El flujo másico que circula a través del 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 2.33, el flujo

está bloqueado.

El caudal másico para la condición de flujo no bloqueado se calcula con la ecuación 2.34 y la ecuación 2.35 en caso de que 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.
- γ , es el cociente de capacidades térmicas del gas.

$$\frac{p_T}{p_0} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.33)$$

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

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R p_0}{(RT_0)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(2(\gamma-1))} \quad (2.35)$$

Un parámetro importante en las ecuaciones anteriores es el área de referencia A_R , 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 el producto de la circunferencia de la válvula con la alzada, es decir

$$A_R = \pi D_v \cdot h_v \quad (2.36)$$

El área de referencia utilizada en ICESym es el área frontal del puerto expuesta a la cámara que se esté analizando, calculada como

$$A_R = h_p \cdot l_v \quad (2.37)$$

El área de cortina se ilustra en la figura 2.14a y el área utilizada en ICESym para el MRCVC en la figura 2.14b. En esta última figura se observan dos zonas coloreadas, que hacen referencia al área de dos cámaras durante el solape de cámaras que ocurre en el puerto.

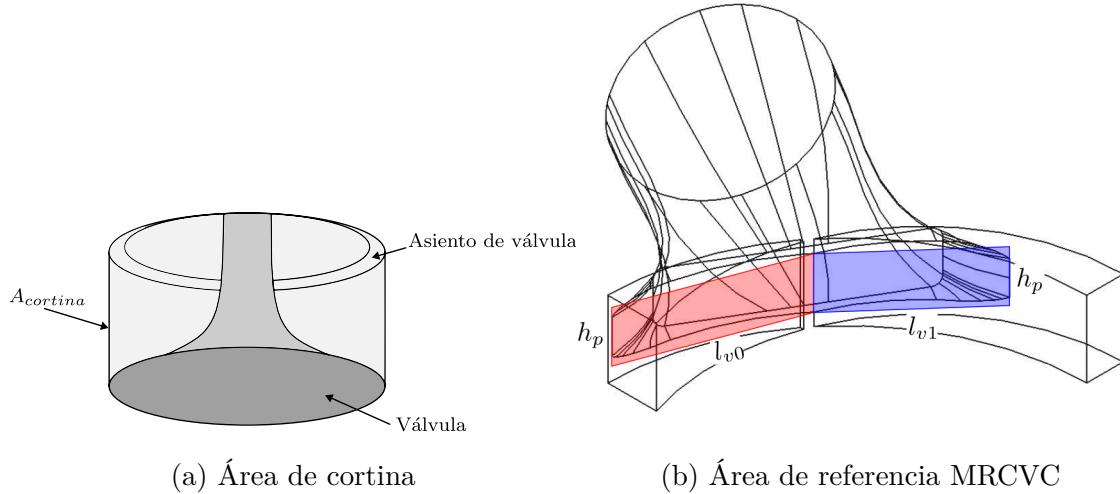


Figura 2.14. Área de referencia

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 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 γ 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 másico que fluye 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*. Esto permitió incluir al simulador 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 el formato de los archivos de salida, eliminando valores que no se utilizaron, con el fin 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

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 un *switch* en el código que permita seleccionar entre un modelo de una o dos variables, con el agregado

de las instrucciones de lectura de datos y armado de un arreglo bidimensional que contiene los valores del mapa de C_D en un orden dado. Con esto se construye una mapa del coeficiente de descarga de la forma $C_D = f(lv, dp)$, 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 . 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 el algoritmo 1, 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.

Algoritmo 1: Interpolación Lineal

Entrada:

$(x_0, y_0), (x_1, y_1)$, son los puntos conocidos;

x , es el punto donde se quiere conocer el valor de y ;

Salida:

y , el valor interpolado para x ;

- 1 **si** $x \leq x_0$ **entonces**
 - 2 $y = y_0;$
 - 3 **devolver** $y;$
 - 4 **si** $x \geq x_1$ **entonces**
 - 5 $y = y_1;$
 - 6 **devolver** $y;$
 - 7 $y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0);$
 - 8 **devolver** $y;$
-

Algoritmo 2: Interpolación Bi lineal

Entrada:

$\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$, es la malla rectangular de puntos conocidos;

(x, y) , es el punto donde se quiere conocer el valor de z ;

Salida:

z , el valor interpolado para (x, y) ;

1 Falta;

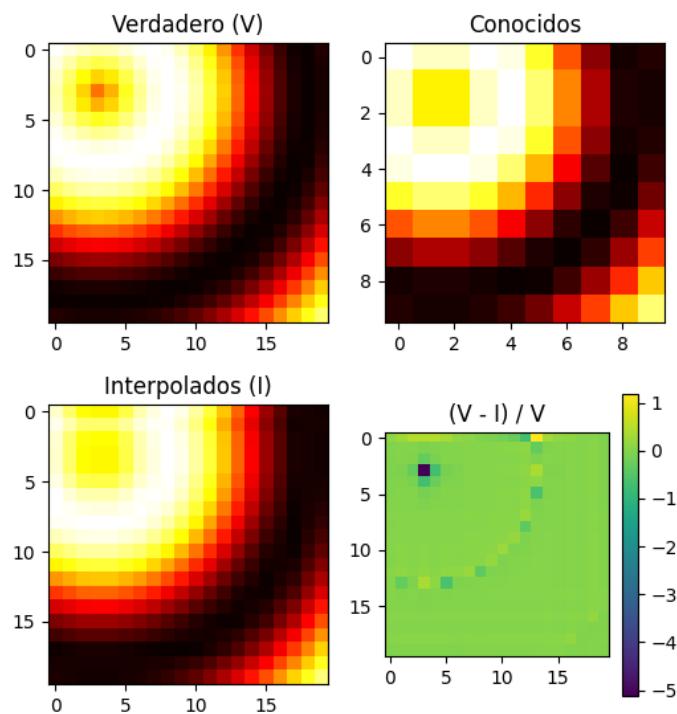
Si bien hay otros métodos de interpolación para estimar el valor de C_D a partir de una nube de puntos, este método es sencillo y da resultados satisfactorios. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo del error obtenido con este método para interpolar una función de prueba $f = \sin(\sqrt{(x^2 + y^2)})$.

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 (MC) 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 con métodos de suavizado 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 se indica en el algoritmo 3.

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 elevado a un exponente arbitrario p . Cuanto más grande 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 el algoritmo 4. 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.

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

Algoritmo 3: 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, dondecada 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      $I[i, j] = v_z[\min(d)]$ ;

```

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

3.2.2 Área de referencia

El área de referencia utilizada por ICESym es el área de cortina 2.12 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 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 Δ_P dado, como se indica en la ecuación 3.2.

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

Algoritmo 4: 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      $I[i, j] = \frac{\sum V_{zi}/d_i}{\sum \frac{1}{d}}$ ;

```

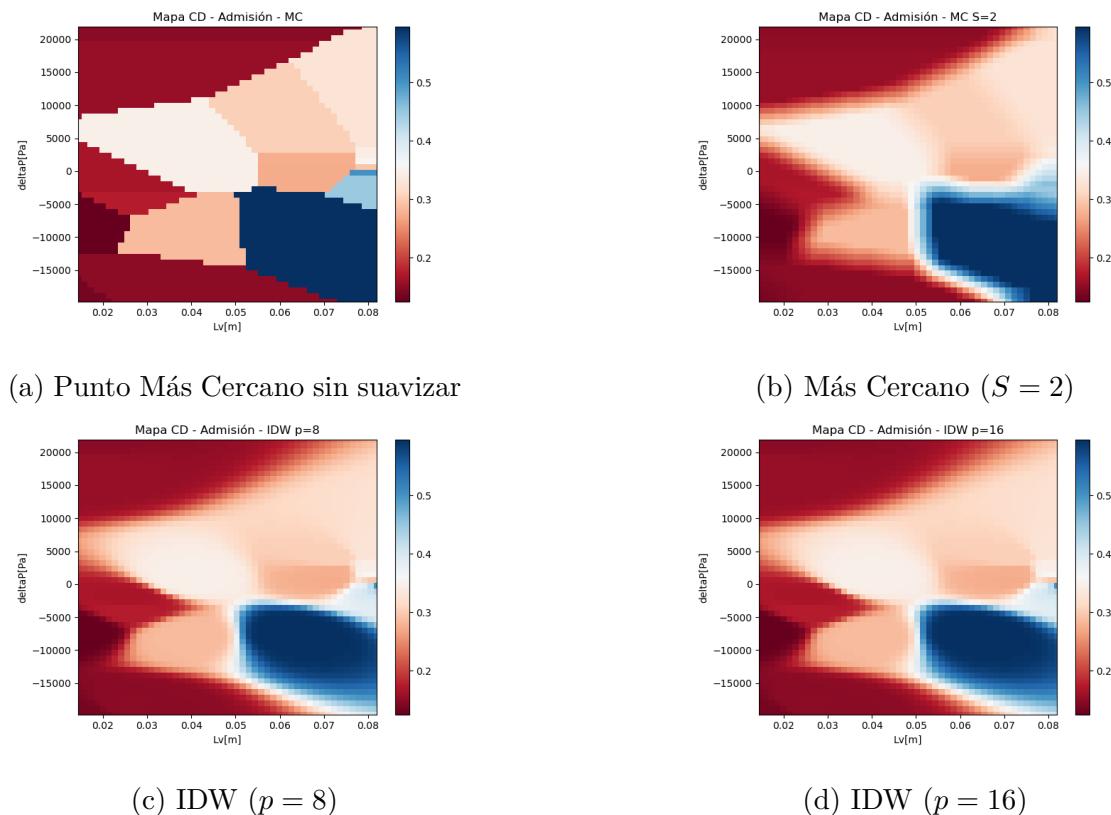


Figura 3.2. Comparación de interpolaciones

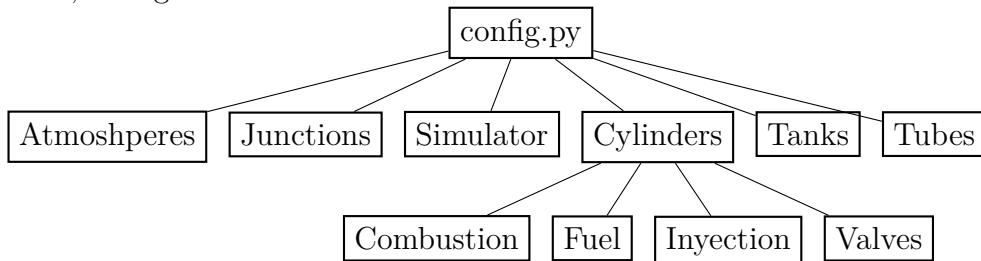
Tanto al inicio como al cierre del puerto ocurre solape de cámaras, por lo que en estos intervalos angulares hay un valor de C_D para cada cámara. Este se calcula con el flujo másico que atraviesa los parches correspondientes a cada cámara y el área de puerto expuesta por cada cámara.

3.2.3 Interfaz con optimizador

Para lograr ejecutar el simulador automáticamente, se creó 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 (GUI) ó ejecutarlo por línea de comando desde una consola. 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 de motores 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.

ICESym requiere de un archivo de configuración con los datos de la simulación a realizar, se organizan como:



- Atmospheres: contiene la presión, densidad y velocidad de la atmósfera, condición de contorno de la simulación
- Cylinders: geometría y condiciones de contorno, estado inicial, combustible, como así también de las válvulas.
- Valves: geometría, tipo de válvula, modelo de C_D , perfil de alzada y datos de C_D , tubo y conectado.
- Junctions: contiene información de las uniones entre elementos (tubos, tanques, cilindros y atmósfera)

- Simulator: configuración de la simulación, velocidades a simular, propiedades de gasl, combustible, directorios y demás
- Tanks: volumen, masa y temperatura de pared de tanques
- Tubes: geometría, cantidad de nodos y conexiones

Los elementos de configuración intervenidos son Cylinders, Valves y Simulator; donde se puede modificar según necesidad los siguientes valores:

- Simulator:
 - RPMS: Velocidades a simular (por ejemplo una lista de [1000, 2000, ...9000])
 - NCYCLES: cantidad de iteraciones por velocidad (un entero mayor o igual a 1)
 - FOLDER NAME: nombre de la carpeta donde se guardan los resultados de simulación
 - SHOW INFO: selector para mostrar o no información (0: no, 1:sí)
 - CONFIG DATA: archivo donde se guardan los datos de configuración
- Cylinders → Valves
 - LvI: perfil de alzada del puerto de admisión (una lista ordenada de valores)
 - LvE: perfil de alzada del puerto de escape (una lista ordenada de valores)
 - IPO: ángulo de apertura del puerto de admisión (un real, positivo)
 - IPC: ángulo de cierre del puerto de admisión (un real, positivo)
 - EPO: ángulo de apertura del puerto de escape (un real, positivo)
 - EPC: ángulo de cierre del puerto de escape (un real, positivo)
 - cd_model: selector de modelo de C_D (1: modelo de 1 variable, 2: modelo de 2 variables)

- * $C_D l_v$ valores de alzada para el mapa de C_D , en caso de que se use el modelo de 2 variables.
- * $C_D d_p$ valores de Δ_P para el mapa de C_D , en caso de que se use el modelo de 2 variables.
- * C_D valores de C_D relacionados con alzada, en caso de que se use el modelo de 1 variable.
 - D_v : diámetro del cabezal de la válvula (un real positivo)
- Tubes
 - longitud: longitud total del tubo de admisión o escape (un real positivo)

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 óptimos locales.

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 de decisión.

Otros métodos de optimización se mueven de un punto al siguiente en el espacio solución basándose en regla de decisión definida por el usuario, esto 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 5.

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 en la simulación:

1. Secundario porque se pueden alcanzar soluciones satisfactorias sin incluir este mecanismo
2. Importante porque utilizado con probabilidades pequeñas de ocurrencia permite 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 5: 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 nueva 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 consistió en implementar y 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 tomó 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.

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, cruce y mutación, pudiendo aprovechar implementaciones de operadores existentes en librerías como DEAP. Estos 8 números binarios luego se convierten una lista de enteros mediante una transformación lineal  $f(x) = a \cdot x + b$ , en la que se ingresa con un entero entre 0 y  $2^n - 1$  para ir del número binario a un decimal, 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. Estos coeficientes ( $a$  y  $b$ ) son particulares a cada parámetro, porque se determinan de acuerdo a los valores que puede tomar

| 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]°        |
| 6  | IFA       | Ángulo geométrico de cierre   | Admisión | [IIA, 90]°     |
| 7  | IIE       | Ángulo geométrico de apertura | Escape   | [0, 90]°       |
| 8  | IFE       | Ángulo geométrico de cierre   | Escape   | [IIA, 90]°     |

Tabla 3.1. Parámetros que representan al motor

cada uno.

De este modo se obtiene el valor de cada uno de los parámetros que hacen a la configuración particular de cada motor en ICESym. El orden de los mismos se mantiene constante, por lo que cada sección del número representa una característica en particular del motor, como se muestra en la figura 3.3.

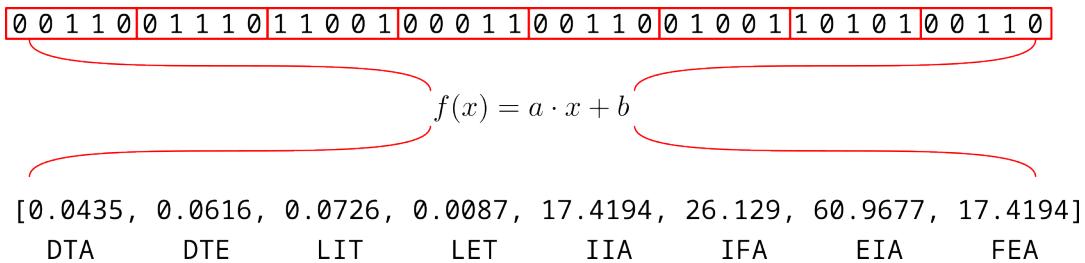


Figura 3.3. Representación del individuo

### 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. Para este trabajo se seleccionó el método de torneo, que 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 cruza 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 cruza de uno o múltiples puntos como también cruza 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 se muestra la figura 3.4, en el algoritmo 6 se esquematiza el proceso.

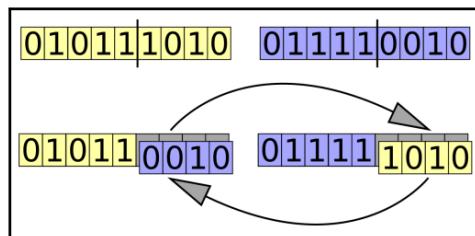


Figura 3.4. Cruza de dos puntos

### 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 estanke en soluciones máximos o mínimos locales.

Algunos de los métodos de mutación utilizados son:

1. FLIP BIT

---

**Algoritmo 6:** 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;
```

---

2. INTERCAMBIO,
3. INVERSIÓN
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 los índices de la lista que define el arreglo, 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.

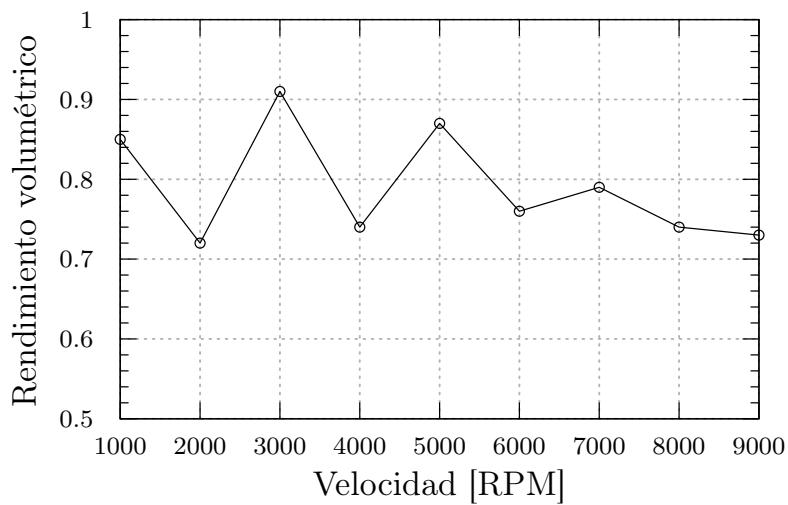


Figura 3.5. Curvas de rendimiento volumétrico aserradas

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.
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:

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

El valor  $S_k$  es el puntaje para la  $k - \text{sima}$  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 candidatos tienen una mayor probabilidad de “pasar” sus características geométricas a las iteraciones siguientes y es algo especialmente problemático en optimizaciones con poblaciones 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 en la que se define el puntaje bruto de un individuo como  $f$  y el puntaje escalado como  $f'$ , la relación entre ambos es  $f' = a \cdot f + b$ . Los coeficientes  $a$  y  $b$  se determinan de modo que  $f'_{\text{media}} = f_{\text{media}}$ , 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 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 ([Goldberg, 1989](#)).

Hacia el final donde la diferencia entre puntajes de los individuos de la población tiende a achicarse, el parámetro  $C_{mult}$  cumple la función de acrecentar las diferencias 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 [7](#) y [8](#).

---

**Algoritmo 7:** 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 8:** Escalado de población

---

**Entrada:**

$f$ , es la aptitud.

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

**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.. 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.

### 3.4.1 Pre-procesado

El preprocessado consiste en definir geometría y condiciones iniciales de la simulación a partir de los datos obtenidos de las simulaciones con el optimizador e 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 un rango de velocidades de 1000 a 9000 RPM, con el fin de identificar las zonas en las condiciones operativas en las que evaluar el puerto. En la figura figura 3.6 se muestra una gráfica de  $\Delta P$  y alzada para los puertos de admisión y escape del motor resultante de la primer iteración (con un  $C_D$  constante).

Como es de esperarse se tienen mayores diferenciales de presión a menores aperturas del puerto porque se está próximo a los eventos de apertura o cierre del puerto. 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 aumenta el área del puerto expuesta a la cámara (alzada). 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 afinaja.

El valor de alzada está directamente relacionado con el 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. En este modelo se representó la mitad que 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 3.7 se

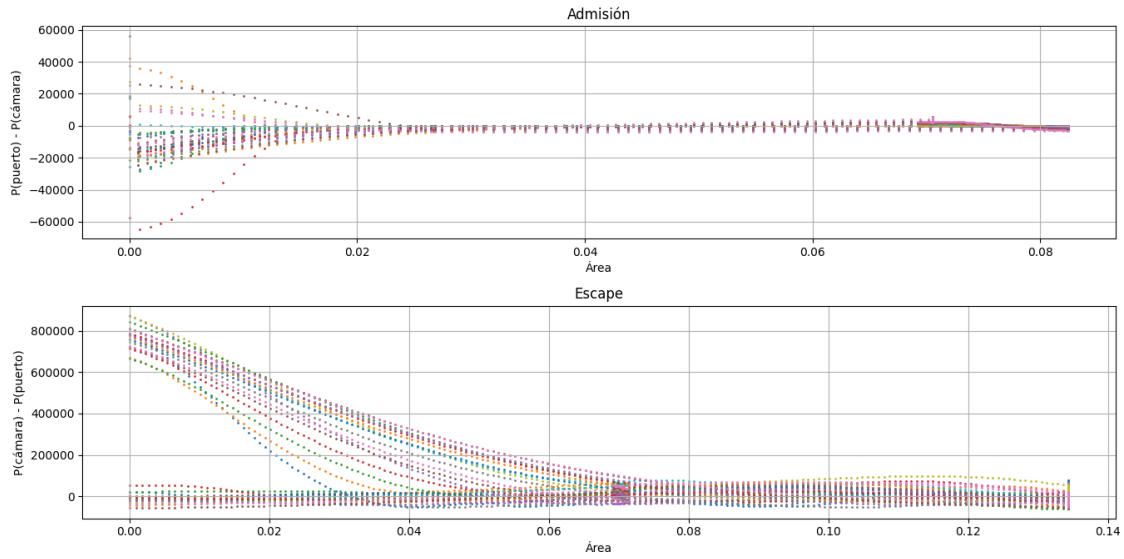


Figura 3.6. Presión en función de la apertura el puerto,  $\Delta P = f(l_v)$

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.

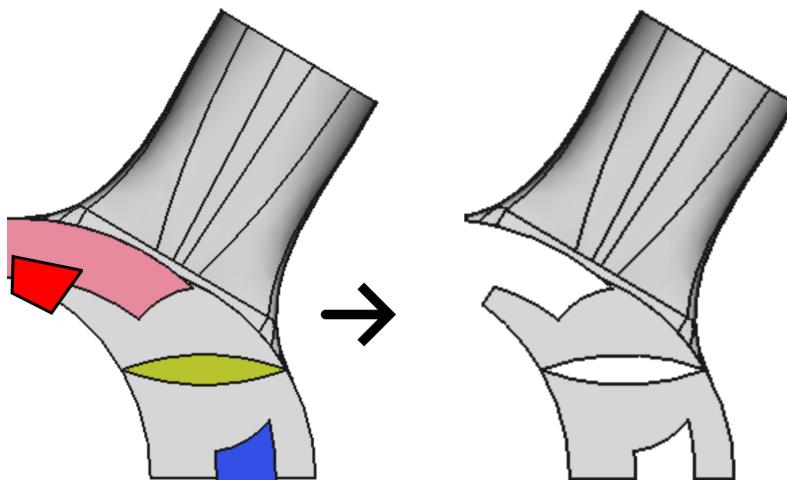
Esta geometría fue generada por el programa FreeCAD ([Team, s.f.](#)), exportada a un archivo “.BREP”<sup>1</sup> para luego ser importada en Salome([Open Cascade, s.f.](#)), que se utiliza para generar una malla cerrada, hermética, que puede ser procesada por los complementos de OpenFOAM utilizados 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 3.8, 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 y pared, ver figura 3.9.

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 stl de buena calidad con elementos de menor tamaño en zonas

---

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

Figura 3.7. Puerto de admisión  $\theta = 50^\circ$  Modelado con FreeCAD

| 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 3.10

de mayor curvatura. En la figura 3.10 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.

### 3.4.1.1 Configuración

Para configurar una simulación de OpenFOAM se organiza el directorio de simulación como se indica en la figura 3.11a para las flujo metrías de aire considerado como incompresible y 3.11b en los casos en los que se tiene en cuenta la compresibilidad del aire. Cada directorio contiene una carpeta con condiciones iniciales “0”,

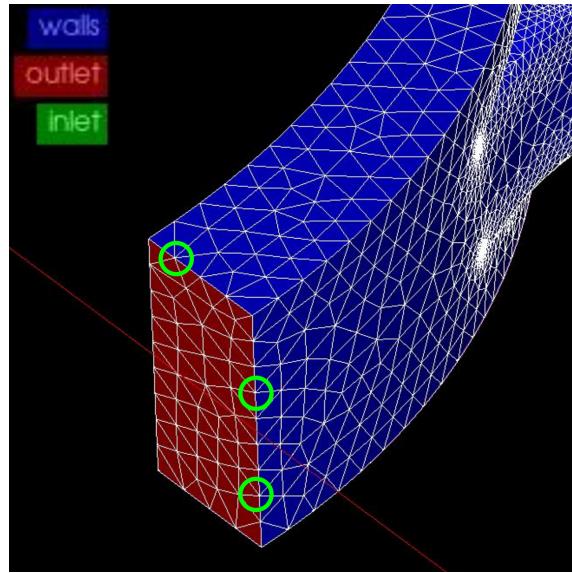


Figura 3.8. Malla hermética

malla “constant”, configuraciones particulares de cada solver “system” y una caperata con los resultados del post-preprocesado el cual se puede realizar durante cada paso de simulación o al final del proceso dependiendo de la configuración que se haya utilziado.

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 separado, esto se realiza así para aprovechar las características paramétricas de OpenFOAM, permitiendo ejecutar una gran cantidad de simulaciones en serie variando solamente los parámetros definidos en un archivo externo “*inital\_conditions.cc*”.

Estos archivos de condiciones inciales 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 másico, necesario para el cálculo del coeficiente de descarga.

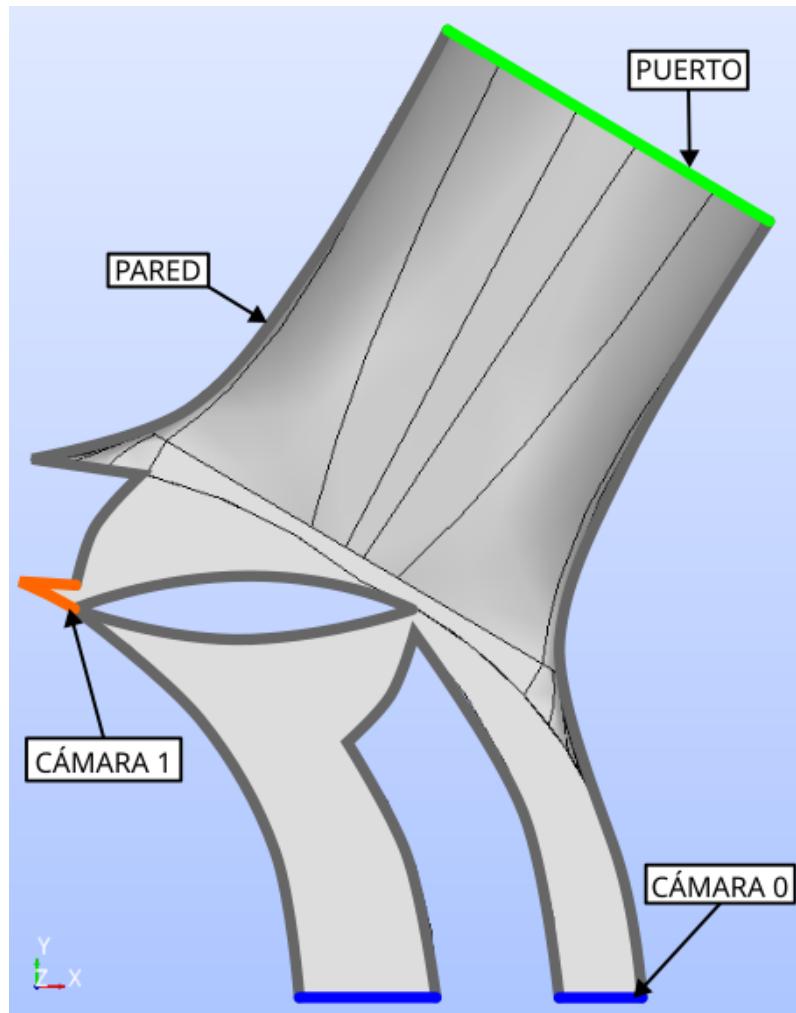


Figura 3.9. Nombres de Nombres de Parches

### 3.4.1.2 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 *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.

El complemento *blockMesh* crea una malla paramétrica con bloques, con opciones para la creación de la malla con gradientes de tamaño de bloques y diferentes

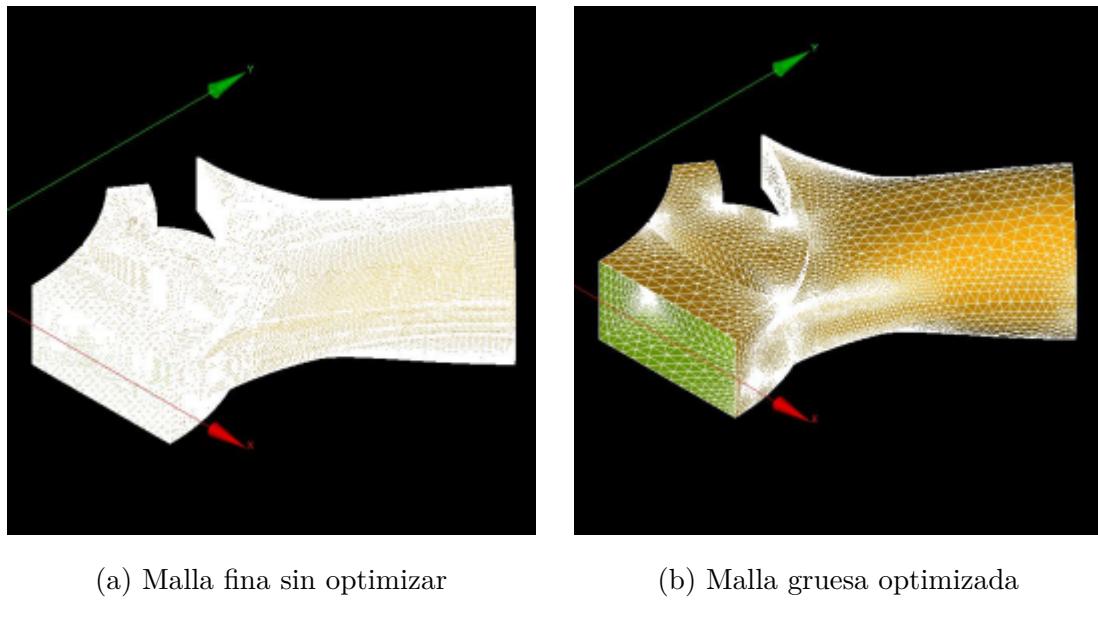


Figura 3.10. Diferentes mallas para flujométrías

opciones para los bordes, estos se pueden construir por líneas rectas, arcos o “splines”. La malla se genera o configura con un diccionario *blockMeshDict* ubicado en *constant/polyMesh*.

El complemento *snappyHexMesh* es el segundo paso del mallado, parte de una malla de bloques como la de openfoam y la *talla* para acomodarse a la geometría dada, 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 crear una un refinamiento mayor en la zona de la capa límite.

```

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

```

(a) *pimpleFoam*(b) *rhoPimpleFoam*

Figura 3.11. Esquema de directorios OpenFOAM

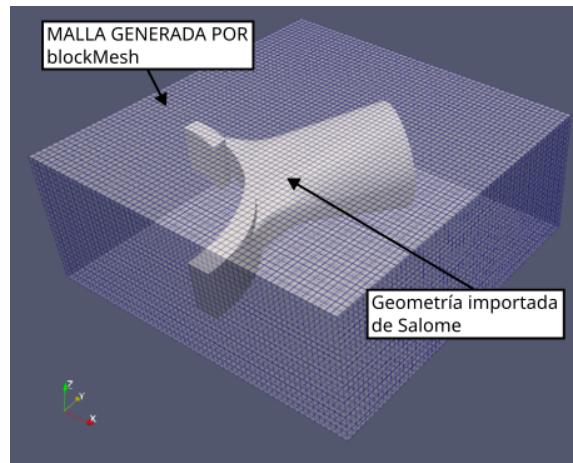


Figura 3.12. Malla de blockMesh y stl de Salome

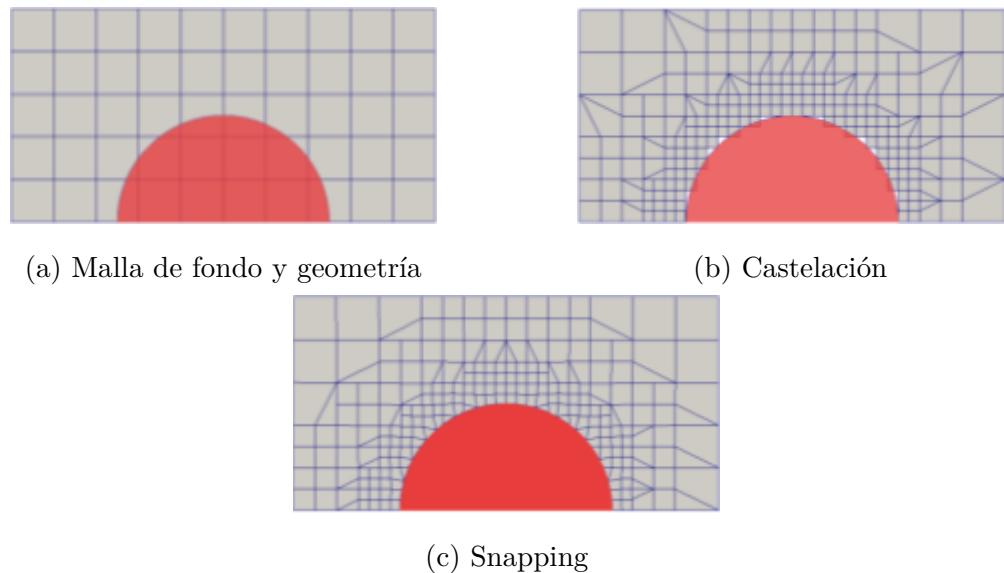


Figura 3.13. Pasos de SnappyHexMesh([Montorfano, 2015](#))

## 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 4.2 y se ilustran en la figura 4.16. 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 al freno máxima de 177 CV a 7500 RPM y un torque máximo de 191 N.m. a 2500 RPM.

NOTA: FALTA CORREGIR CON EL MODELO DE FLOR

| 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 y así poder generar la geometría a evaluar con las flujometrías.

La altura del puerto del lado de la cámara de combustión se mantuvo en dos

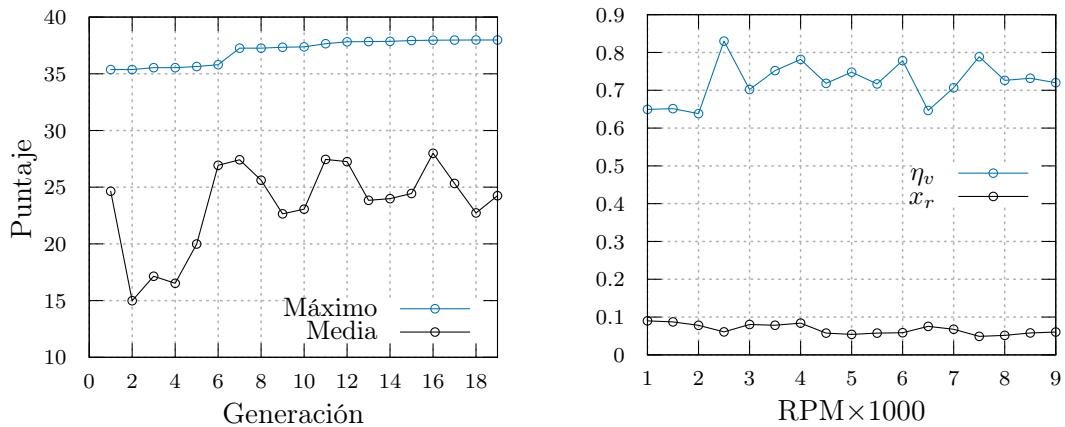


Figura 4.1. Primer Iteración

| DTA<br>[mm] | DTE<br>[mm] | LIT<br>[mm] | LET<br>[mm] | IIA<br>[grado] | IFA<br>[grado] | EIA<br>[grado] | EFA<br>[grado] |
|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 97.24       | 81.15       | 519.31      | 976.66      | 1.12           | 70.15          | 85.14          | 11.13          |

Tabla 4.2. Geometría del mejor candidato

tercios del a altura de cámara  $h_p = \frac{2}{3}h_c$ , manteniendo el eje central de cada puerto de forma que 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.

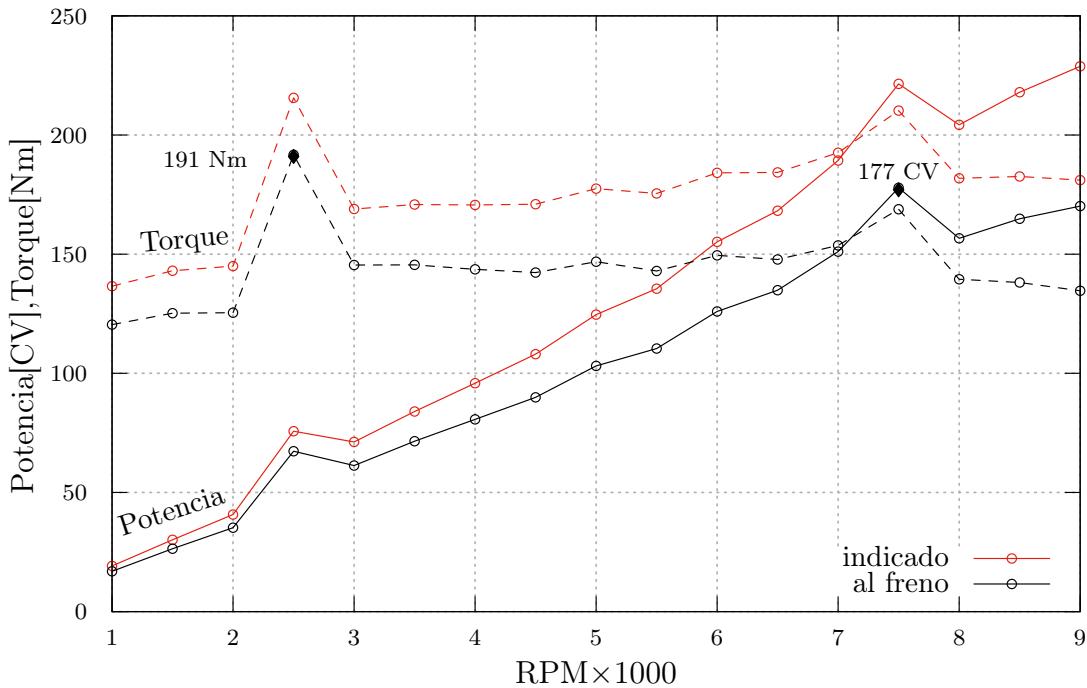


Figura 4.2. Torque y Potencia de Primer Iteración

### 4.3 Flujojometrías

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 flujojometrías, 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 flujojometrías pudiendo realizar un total de 36 simulaciones que devolvieron 56 valores de  $C_D$ .

Algunas flujojometrías 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 flujojometría con mallas base de 5mm.

NOTA: falta agregar una tabla o gráfica con estas flujojometrías

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

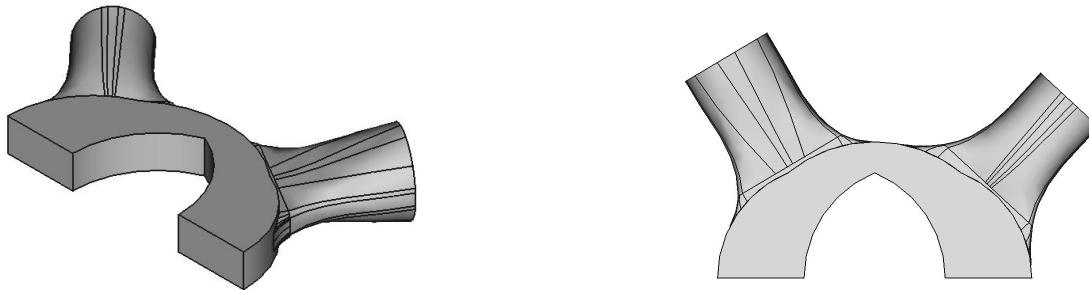


Figura 4.3. CAD Primer Iteración

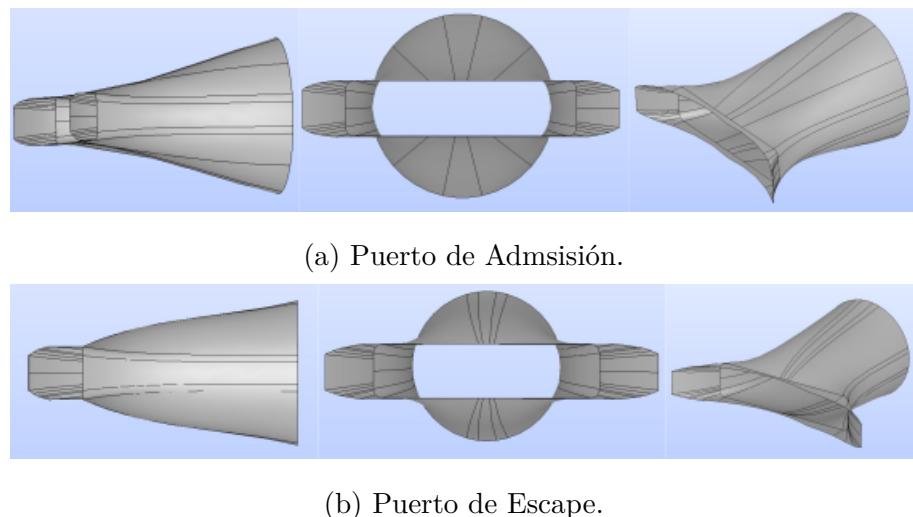


Figura 4.4. CAD Primer iteración (vistas fuera de escala).

porción de datos que se seleccionó para calcular  $\dot{m}$ , esto se realizó tomando la media de los últimos  $n$  valores obtenidos, los resultados de las flujométrias para puerto de admisión y escape se presentan en el Anexo 7. La totalidad de puntos evaluados se presentan en las tablas 7.1 y 7.2 para el puerto de admisión y escape respectivamente.

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. 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 4.12.

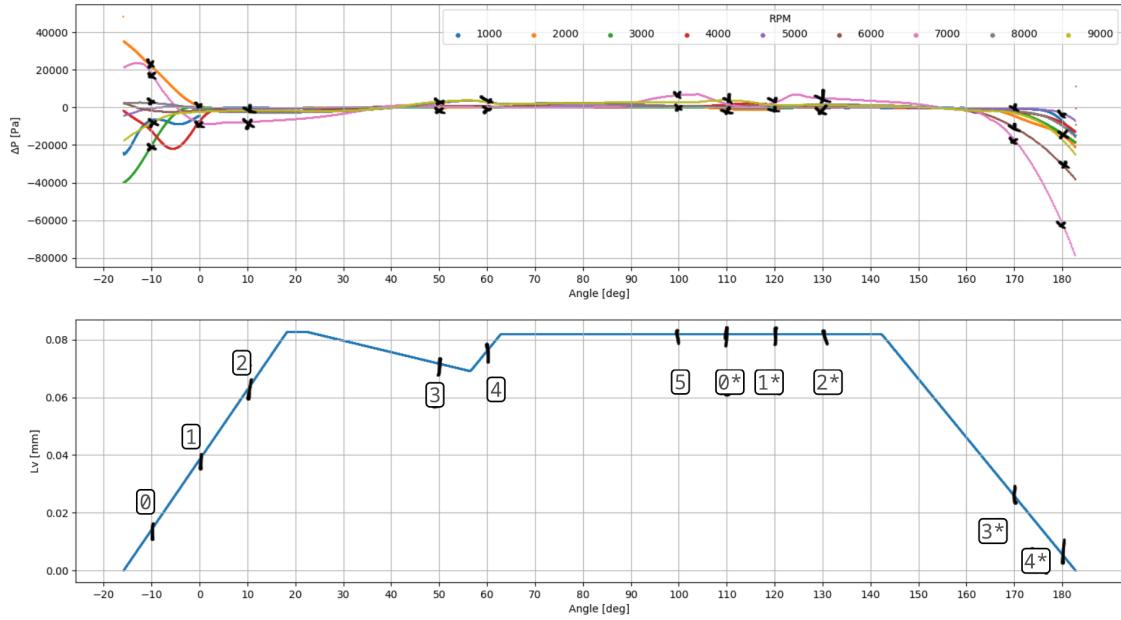


Figura 4.5. Flujometrías puerto de admisión

### 4.3.1 Puerto de Admisión

En el mapa del coeficiente de descarga para el puerto de admisión se puede observar en rojo las zonas de menor eficiencia del escurrimiento. Esto ocurre para valores chicos de alzada, relacionados con la apertura y cierre del puerto donde las presiones y velocidades de flujo involucradas son mayores aumentando las pérdidas de carga.

#### 4.3.1.1 $C_D$ máximo

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 4.9, 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, este corresponde a masa residual que queda

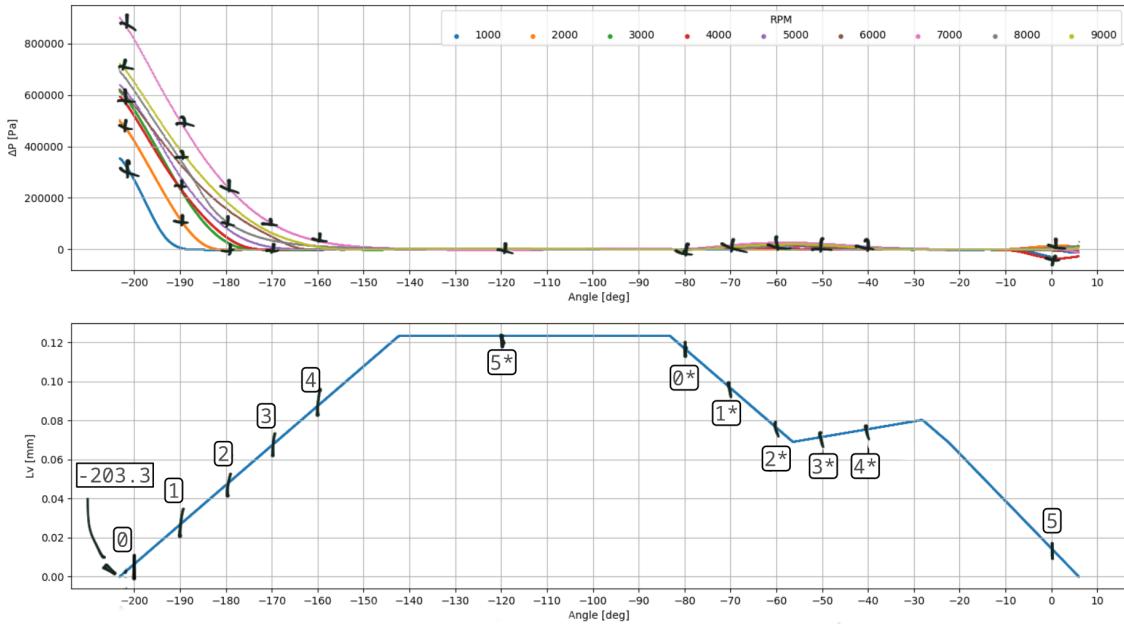


Figura 4.6. Flujometrías puerto de escape

atrapado luego del barrido del puerto de escape.

#### 4.3.1.2 $C_D$ mínimo

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  $\dot{m} \simeq 5g/\text{seg}$ ,  $l_v = 144.3\text{mm}$  y  $\Delta P = -6.57\text{KPa}$  para el puerto a  $590^\circ$  y 1 000 RPM, ver figura 4.10.

#### 4.3.1.3 $\dot{m}$ máximo

En términos de flujo másico, el máximo es  $\dot{m}_{\max} \simeq 70g/\text{seg}$  y ocurre durante un período 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 4.11.

### 4.3.2 Puerto de Escape

En la figura 4.12 se ilustra el mapa obtenido para el puerto de escape, la tendencia es similar al puerto de admisión con la diferencia que no hay gradientes positivos de presión, la zona con mayores valores de  $C_D$  corresponde a la máxima apertura del

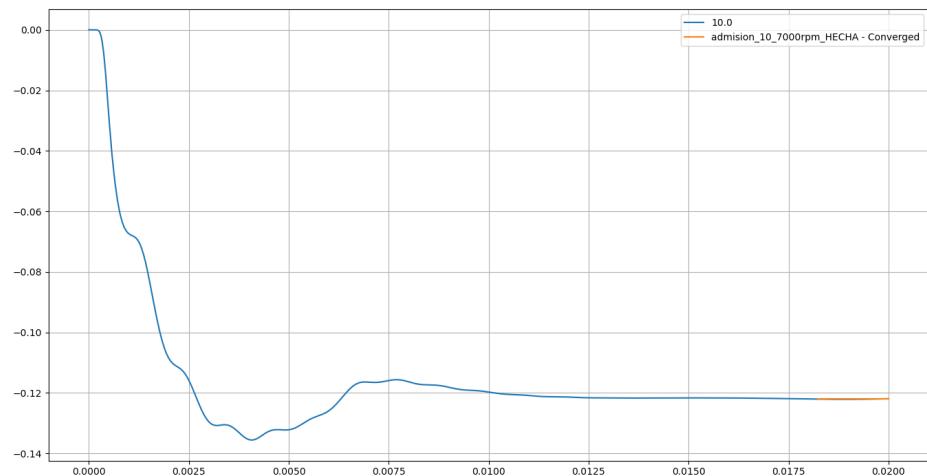


Figura 4.7. Puerto de admisión 10° 7000RPM

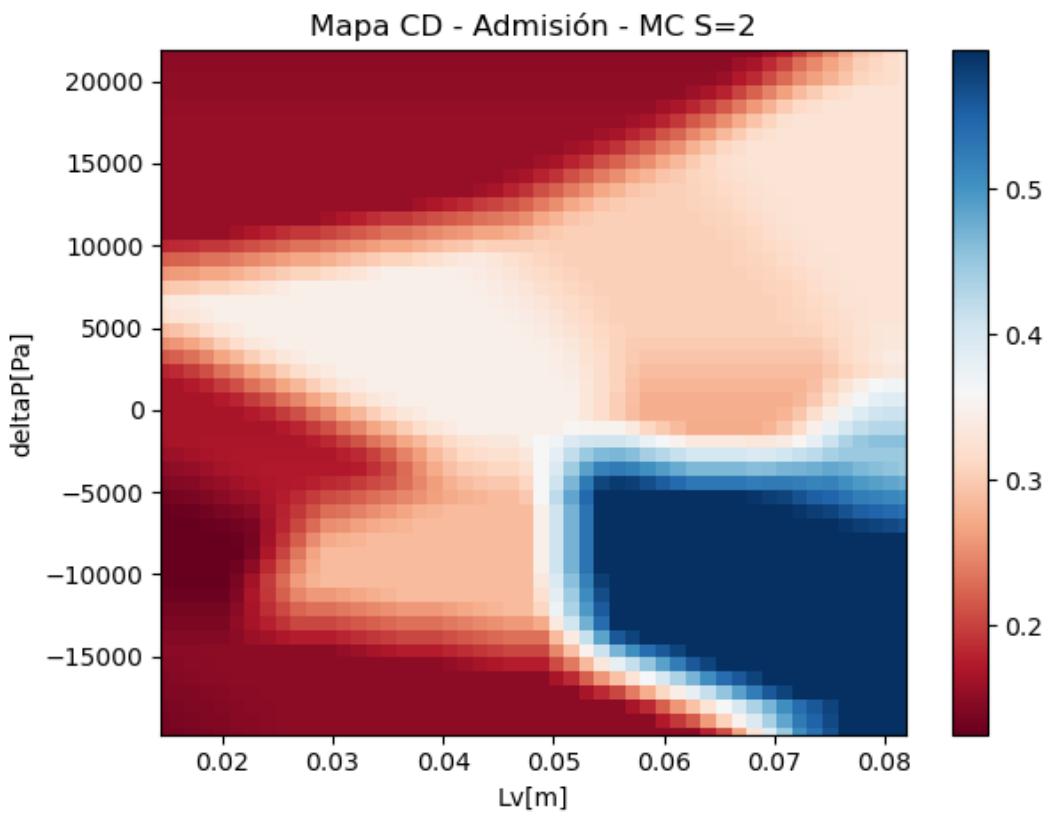
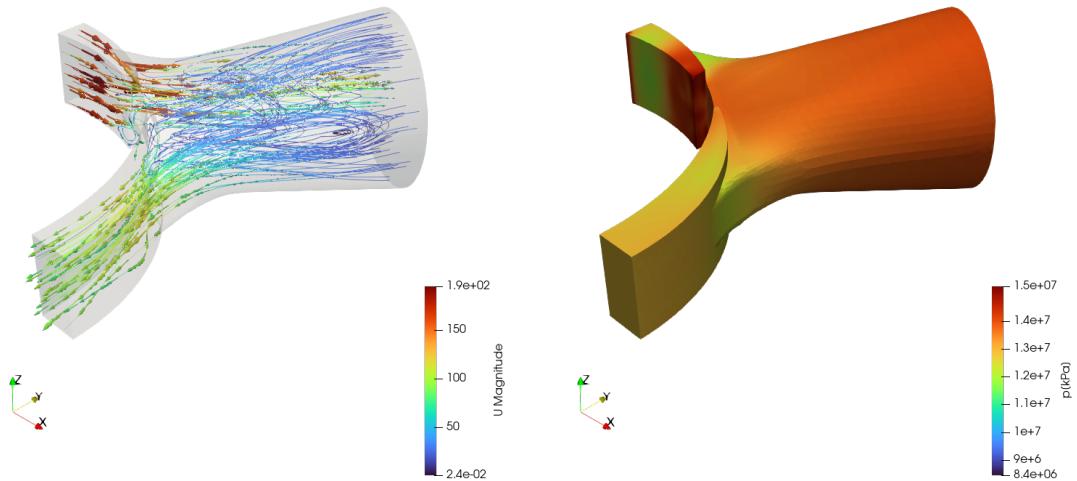
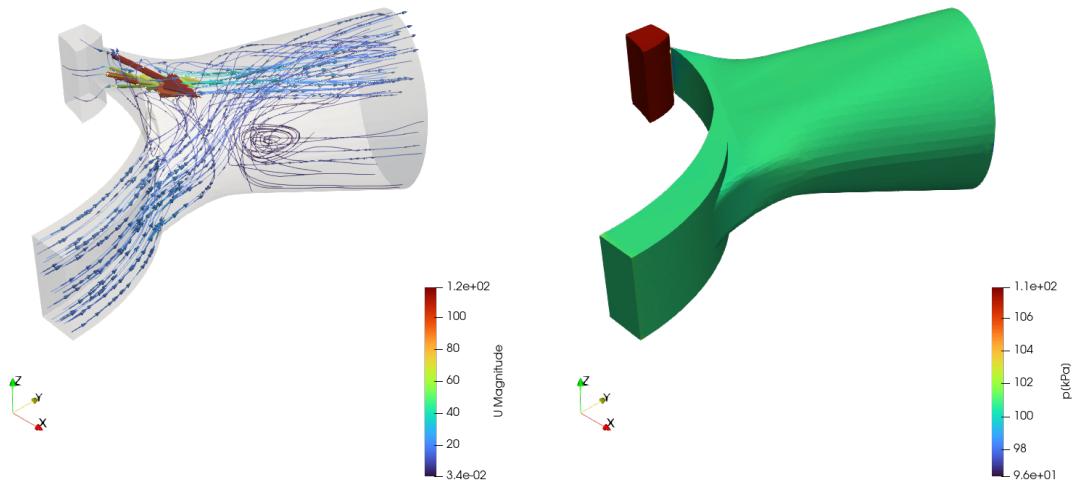


Figura 4.8. Puerto de admisión

puerto y valores de presión intermedios.

Figura 4.9. Admisión - Valor máximo de  $C_D$ Figura 4.10. Admisión - Valor mínimo de  $C_D$ 

#### 4.3.2.1 $C_D$ máximo

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

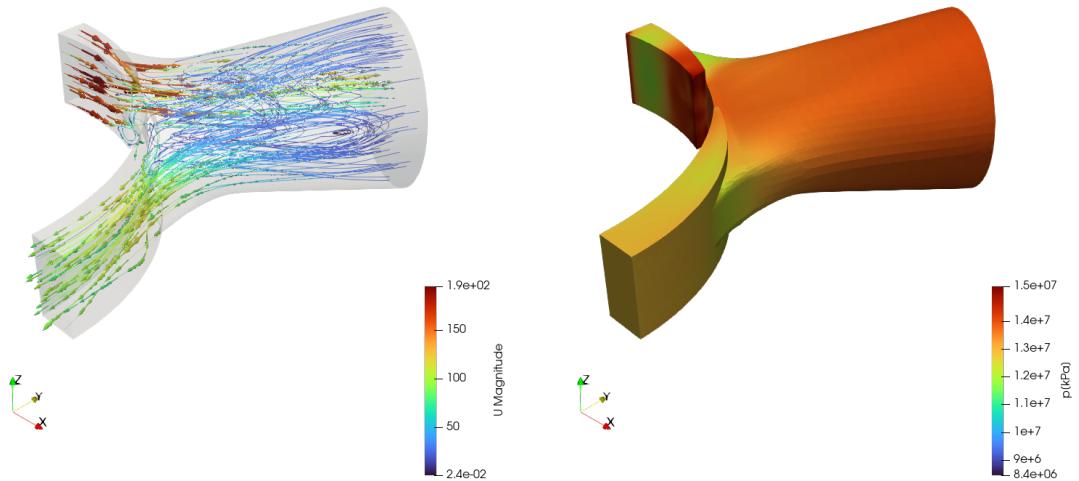
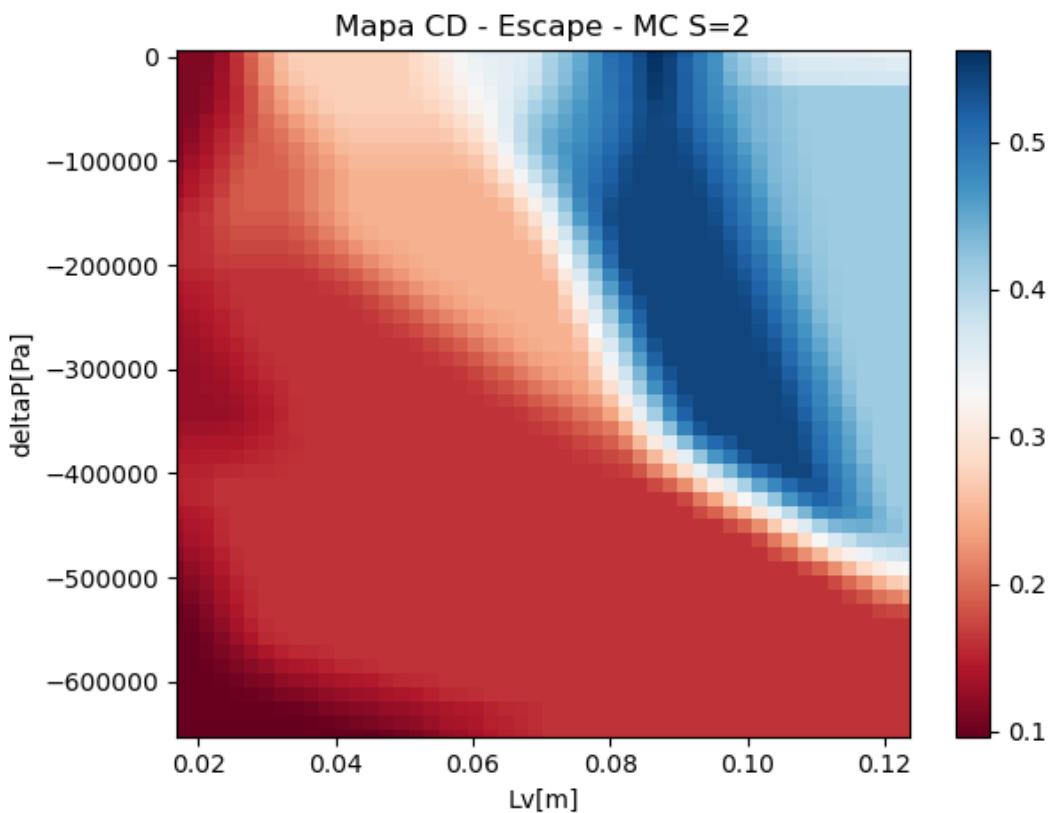
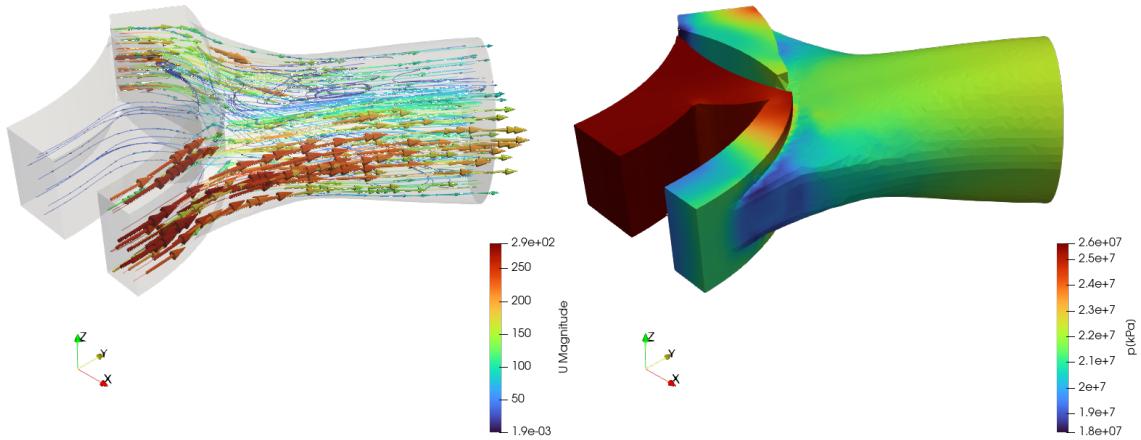
Figura 4.11. Admisión - Valor máximo de  $\dot{m}$ 

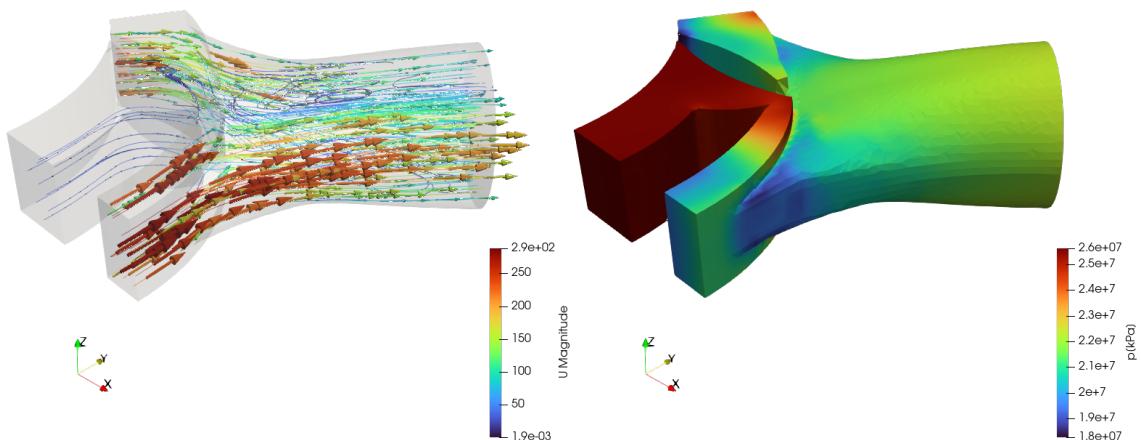
Figura 4.12. Puerto de escape

#### 4.3.2.2 $C_D$ mínimo

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  $\dot{m} =$

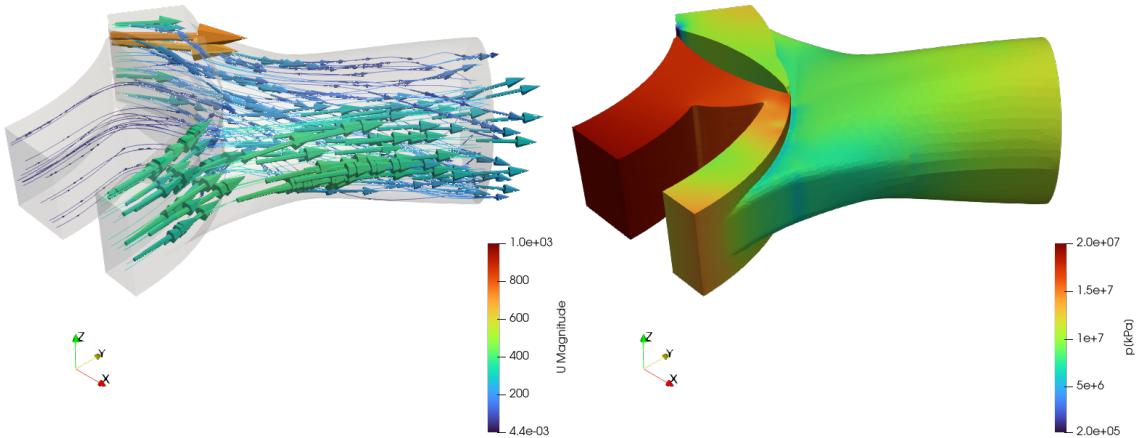
Figura 4.13. Escape - Valor máximo de  $C_D$ 

$38.6g/\text{seg}$ , ver figura 4.14.

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

### 4.3.2.3 $\dot{m}$ máximo

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

Figura 4.15. Escape - Valor máximo de  $\dot{m}$ 

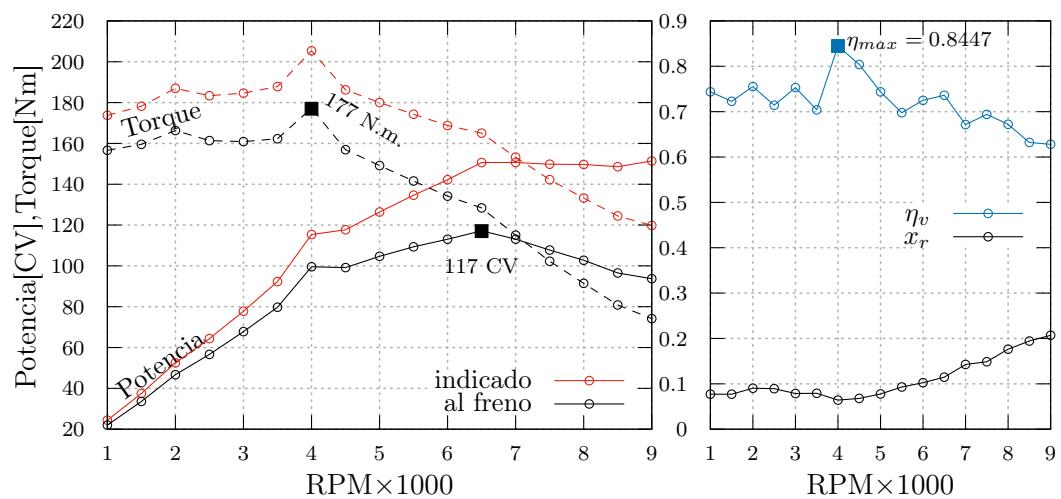
#### 4.4 Segunda iteración y resultado final

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 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 variaión se dan 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 4.17.

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 4.17 se nota los efectos del coeficiente de descarga en la simulación del motor, esto se ve comparando los resultados de la primera iteración con coeficientes de descarga constantes a la segunda con el mapa de  $C_D$  en función de presión y velocidad de operación del motor.

| 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



(a) Potencia indicada y al freno

(b) Rendimiento Volumétrico

Figura 4.16. Segunda Iteración

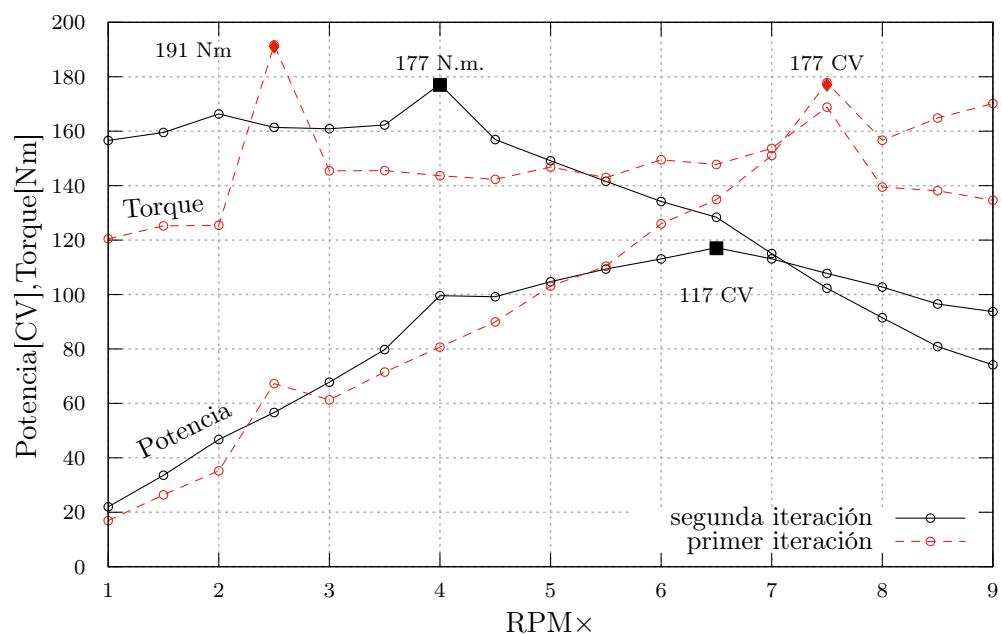


Figura 4.17. Comparativa de Torque y potencia al freno

## 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. |       | [ $\frac{g}{mol}$ ] | [ $\frac{kJ}{kmolK}$ ] | [ $\frac{kJ}{kmolK}$ ] | [ $\frac{cm^2}{kmolK}$ ] | [ $\frac{cm^2}{kmolK}$ ] | [ $cm^2$ ] | [ $cm^2$ ] |
| 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. |       |          | [ $\frac{g}{m \cdot \text{at}}$ ] | [ $\frac{kJ}{kmol \cdot K}$ ] | [ $\frac{kJ}{kmol \cdot K}$ ] | [ $\frac{cm^2}{kmol \cdot K}$ ] | [ $\text{cm}^2$ ] | [ $\text{cm}^2$ ] |
| 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      | 2,49    | 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