

**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 2024

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

**NICOLÁS DANIEL BARRIOS**

Director: Dr. Ing. **EZEQUIEL JOSÉ 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 2024

# **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 2024

Tribunal evaluador:

- Dr. Ing. PRADO, Ricardo.
- Ing. ÁLVAREZ, Pablo.
- Ing. ZAPPA, Andrés.
- Mg. Ing. BOCCANERA, Daniel (Suplente).

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

Autor: Nicolás Daniel Barrios

Director: Dr. Ing. Ezequiel José López

## Resumen

En este trabajo se optimizaron los sistemas de admisión y escape del Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante (MRCVC) utilizando herramientas de simulación computacional tales como ICESym (simulador 0D/1D de motores de combustión interna), OpenFOAM (herramienta CFD de código abierto) y un optimizador basado en un algoritmo genético (AG) desarrollado con la librería DEAP (Python), entre otros.

Primero, se desarrolló una librería de funciones para acoplar el AG con ICESym, permitiendo configurar, ejecutar y procesar datos del simulador. También se modificó ICESym, agregando un modelo de coeficientes de descarga ( $C_D$ ) dependiente de presión y apertura del puerto, permitiendo un mejor modelado del flujo de gas a través de los puertos.

Se realizó una optimización inicial de la geometría de los puertos del MRCVC con valores de  $C_D$  constantes, buscando maximizar el rendimiento volumétrico. La geometría resultante se modeló con un programa de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) de código abierto, FreeCAD. Este resultado, junto con el estado termodinámico del gas obtenido de los datos de salida de ICESym, se utilizó para realizar flujometrías virtuales de los puertos en diferentes configuraciones empleando OpenFOAM, y así obtener el correspondiente mapa de  $C_D$ . Este mapa se utilizó como retroalimentación del AG para una nueva optimización, logrando una geometría de puertos satisfactoria para el estado actual del motor.

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

# Design of the Intake and Exhaust Systems of the Constant Volume Combustion Rotary Engine

Author: Nicolás Daniel Barrios

Advisor: Dr. Ing. Ezequiel José López

## Abstract

In this work, the intake and exhaust systems of the Constant Volume Combustion Rotary Engine were optimized using computational simulation tools such as ICESym (0D/1D internal combustion engine simulator), OpenFOAM (open-source CFD tool), and a genetic algorithm (GA) based optimizer developed with the DEAP (Python) library, among others.

First, a library of functions was developed to couple the GA with ICESym, allowing configuration, execution, and data processing from the simulator. ICESym was also modified to include a discharge coefficient ( $C_D$ ) model dependent on pressure and port opening, enabling better modeling of gas flow through the ports.

An initial optimization of the engine port geometry was performed with constant  $C_D$  values, aiming to maximize volumetric efficiency. The resulting geometry was modeled with an open-source computer-aided design (CAD) program, FreeCAD. This result, along with the gas thermodynamic state obtained from ICESym output data, was used to conduct virtual flow measurements of the ports in different configurations using OpenFOAM, thereby obtaining the corresponding  $C_D$  map. This map was used as feedback for the GA in a new optimization, achieving a satisfactory port geometry for the current engine state.

*Keywords: MRCVC, Volumetric Efficiency, Gas Exchange Systems, CFD, Optimization, Genetic Algorithm.*

# Índice general

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1	Motores de Combustión Interna . . . . .	5
2.2	Motores Rotativos . . . . .	7
2.3	Parámetros Operativos e Indicadores de Rendimiento . . . . .	8
2.3.1	Volumen Desplazado . . . . .	8
2.3.2	Relación de Compresión . . . . .	9
2.3.3	Trabajo Indicado por Ciclo . . . . .	9
2.3.4	Consumo Específico de Combustible y Rendimiento de Con- versión del Combustible . . . . .	10
2.3.5	Presión Media Efectiva . . . . .	10
2.3.6	Rendimiento Volumétrico . . . . .	11
2.3.7	Fracción de Gases Residuales . . . . .	14
2.4	Sintonización del Sistema de Admisión . . . . .	15
2.5	Sintonización del Sistema de Escape . . . . .	16
2.6	Combustión . . . . .	17
2.6.1	Propiedades Termodinámicas de Mezclas aire-combustible . . .	20
2.7	Coeficiente de Descarga $C_D$ . . . . .	21
<b>3</b>	<b>HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES</b>	<b>26</b>
3.1	Internal Combustion Engine Simulator . . . . .	26
3.2	Modificaciones a ICESym . . . . .	26
3.2.1	Flujo a Través de los Puertos . . . . .	26
3.2.2	Área de Referencia . . . . .	30
3.2.3	Interfaz con Optimizador . . . . .	32
3.3	Optimizador y Algoritmo Genético . . . . .	34
3.3.1	Población . . . . .	37

3.3.2	Selección	39
3.3.3	Cruza	39
3.3.4	Mutación	40
3.3.5	Función Objetivo	41
3.4	OpenFOAM	45
3.5	Esquemas de Discretización	46
3.5.1	Derivadas temporales, $\delta/\delta t$	46
3.5.2	Gradientes	47
3.5.3	Gradiente normal a una superficie	47
3.5.4	Divergencia	49
3.5.5	Laplacianos	49
<b>4</b>	<b>DESARROLLO</b>	<b>50</b>
4.1	Geometría y Ciclo Operativo del MRCVC	50
4.1.1	Sistemas de Intercambio de Gases	52
4.1.2	Área de Referencia	58
4.1.3	Pérdidas por fricción	58
4.2	Flujometrías Virtuales	59
4.2.1	Modelos de Turbulencia	59
4.2.2	Condiciones Iniciales	61
4.2.3	Malla	63
4.2.4	Esquemas de Discretización Seleccionados	67
4.3	Uso de OpenFOAM	67
4.3.1	Configuración	67
4.3.2	Malla	69
4.3.3	Pre-procesado	72
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>77</b>
5.1	Primera Iteración	77
5.2	Modelo de CAD	80
5.3	Flujometrías	81
5.3.1	Puerto de Admisión	83

5.3.2 Puerto de Escape . . . . .	85
5.4 Segunda Iteración y Resultado Final . . . . .	86
<b>6 CONCLUSIONES</b>	<b>91</b>
<b>7 REFERENCIAS</b>	<b>92</b>
<b>8 ANEXO I</b>	<b>95</b>



## Índice de figuras

1.1	Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante . . . . .	1
2.1	Motor 1909 5HP Otto Special Electric Lighting de Wayne Grenning .	5
2.2	Ciclo de cuatro tiempos . . . . .	7
2.3	$b_{mep}$ y rendimiento volumétrico vs velocidad de operación. . . . .	11
2.4	Diagrama de presión vs ángulo de cigüeñal (Heywood, 2018) . . . . .	16
2.5	Diagramas P-V para ciclos ideales(Heywood, 2018) . . . . .	18
2.6	Rendimiento de conversión del combustible en función de $r_c$ para ciclos de gas ideal de combustión a volumen constante, a presión constante y a presión limitada (Heywood, 2018) . . . . .	19
2.7	Banco de flujometrías Super-Flow SF-750 . . . . .	22
2.8	Comparación entre flujometrías de dos tapas de cilindro de un BMW S14 . . . . .	23
2.9	Área de cortina . . . . .	25
3.1	Interpolación bilineal <sup>1</sup> . . . . .	27
3.2	Interpolación bilineal de $\sin(\sqrt{x^2 + y^2})$ . . . . .	28
3.3	Suavizado por promedio con celdas vecinas, S=1 . . . . .	29
3.4	Comparación de métodos de interpolación . . . . .	32
3.5	Representación del individuo . . . . .	38
3.6	Cruza de dos puntos (Wirsansky, 2020) . . . . .	40
3.7	Curvas de rendimiento volumétrico aserradas . . . . .	42
4.1	Parámetros geométricos del MRCVC (Álvarez Roldán, 2020) . . . . .	51
4.2	Variación del volumen del MRCVC . . . . .	52
4.3	Ciclo operativo del MRCVC . . . . .	52
4.4	Ciclo operativo del MRCVC . . . . .	53
4.5	Esquema del sistema de intercambio de gases . . . . .	53
4.6	Puerto de admisión y escape . . . . .	54

4.7	Refinamiento de malla para puerto de admisión . . . . .	55
4.8	Refinamiento de malla para puerto de escape . . . . .	56
4.9	Convergencia de malla de puerto de admisión . . . . .	57
4.10	Convergencia de malla de puerto de escape . . . . .	57
4.11	Área de referencia MRCVC . . . . .	58
4.12	Solape de cámaras . . . . .	62
4.13	Refinamiento de malla para puerto de admisión . . . . .	65
4.14	Refinamiento de malla para puerto de escape . . . . .	66
4.15	Convergencia de malla de puerto de admisión . . . . .	66
4.16	Convergencia de malla de puerto de escape . . . . .	67
4.17	Esquema de directorios OpenFOAM . . . . .	70
4.18	Malla de blockMesh y stl de Salome . . . . .	71
4.19	Pasos de SnappyHexMesh(Montorfano, 2015) . . . . .	71
4.20	Presión en función de la apertura el puerto, $\Delta P = f(l_v)$ . . . . .	73
4.21	Puerto de admisión para $\theta = 50^\circ$ modelado con FreeCAD . . . . .	74
4.22	Malla hermética . . . . .	74
4.23	Nombres de Parches . . . . .	75
4.24	Diferentes mallas para flujometrías . . . . .	76
5.1	Evolución de la población . . . . .	78
5.2	Rendimiento volumétrico y fracción de gases residuales del motor seleccionado . . . . .	79
5.3	Torque y Potencia de Primera Iteración . . . . .	79
5.4	CAD Primera iteración . . . . .	80
5.5	CAD Primera iteración (vistas fuera de escala). . . . .	81
5.6	Flujometrías puerto de admisión . . . . .	82
5.7	Flujometrías puerto de escape . . . . .	82
5.8	Puerto de admisión $10^\circ$ 7000 RPM . . . . .	83
5.9	Puerto de admisión . . . . .	84
5.10	$C_D$ del puerto de admisión . . . . .	84
5.11	Admisión - Máximo $C_D$ . . . . .	85

5.12 Puerto de escape . . . . .	86
5.13 $C_D$ del puerto de escape . . . . .	86
5.14 Escape - Valor máximo de $C_D$ . . . . .	87
5.15 Escape - Valor máximo de $\dot{m}$ . . . . .	88
5.16 Comparativa candidatos . . . . .	89
5.17 Comparativa de Torque y potencia al freno . . . . .	90

## Índice de tablas

3.1	Parámetros que representan al motor . . . . .	37
4.1	Datos de la geometría del MRCVC considerados en el trabajo . . . . .	51
4.2	Pérdidas por fricción en sellos de paletas y sellos estatóricos . . . . .	59
4.3	Valores iniciales . . . . .	63
4.4	Valores calculados . . . . .	63
4.5	Figura 4.15 tabulada . . . . .	64
4.6	Figura 4.16 tabulada . . . . .	65
4.7	Esquemas de discretización para flujo incompresible . . . . .	68
4.8	Esquemas de discretización para flujo compresible . . . . .	69
4.9	Configuración de mallas mostradas en la Figura 4.24 . . . . .	76
5.1	Configuración utilizada. . . . .	78
5.2	Datos geométricos del mejor candidato . . . . .	80
5.3	Valores máximos $C_D$ y $\dot{m}$ para puertos . . . . .	83
5.4	Geometrías de segunda iteración . . . . .	87
8.1	Mapa de $C_d$ del puerto de Admisión . . . . .	96
8.2	Mapa de $C_D$ del puerto de escape . . . . .	97

## Nomenclatura

$G$  Cantidad de generaciones

$N$  Cantidad de individuos

## Flujometrías

$\Delta P$  Diferencia de presión a través de un puerto

$\epsilon$  Tasa de disipación de energía cinética turbulenta

$\gamma$  Cociente de calores específicos

$\kappa$  Energía cinética turbulenta

$\mu$  Viscosidad dinámica

$\nu$  Viscosidad cinemática

$\nu_t$  Viscosidad cinemática turbulenta

$\theta$  Ángulo de ciclo

$C_{D,int}$  Coeficiente de descarga interpolado

$C_D$  Coeficiente de descarga

$C_P$  Capacidad calórica a presión constante

$C_V$  Capacidad calórica a volumen constante

$CFD$  *Computational Fluid Dynamics*.

$D_\kappa$  Difusividad efectiva para  $\kappa$

$I$  Intensidad de turbulencia

$l_m$  Longitud de mezcla o escala de viscosidad

$M_M$  Masa molar

$P_\kappa$  Tasa de producción de energía cinética turbulenta

$P_R$  Número de Prandtl

### Geométricas

$A_C$  Área de cortina

$A_R$  Área de pasaje de flujo o de referencia

$D_v$  Diámetro de válvula

$EFA$  Ángulo de cierre del puerto de escape, ver Figura 4.6

$EIA$  Ángulo de apertura del puerto de escape, ver Figura 4.6

$F_v$  Área efectiva de válvula

$h_c$  Altura de cámara

$h_p$  Altura de puerto

$IFA$  Ángulo de cierre del puerto de admisión, ver Figura 4.6

$IIA$  Ángulo de apertura del puerto de admisión, ver Figura 4.6

$l_v$  Alzada de válvula

$n$  Número de paletas del MRCVC

$R$  Radio de referencia del MRCVC, ver Figura 4.2

$r$  Radio de trayectoria de paletas, ver Figura 4.2

$R_e$  Radio de cara externa del rotor del MRCVC, ver Figura 4.2

$R_i$  Radio de cara interna del rotor del MRCVC, ver Figura 4.2

$V_d$  Volumen desplazado

$V_{max}$  Volumen máximo en la cámara de combustión

$V_{min}$	Volumen mínimo de la cámara
$\dot{m}_f$	Caudal másico de combustible
$\dot{m}$	Caudal másico
$\dot{m}_a$	Caudal másico de aire
$\eta_f$	Rendimiento de conversión de combustible
$\eta_v$	Rendimiento volumétrico
$\phi$	Relación de equivalencia combustible/aire
$\rho$	Densidad
$\rho_a$	Densidad del aire
$\rho_{a,i}$	Densidad del aire de admisión
$a_i$	Coefficiente de polinómicas utilizadas para cálculo de $\tilde{c}_p$ , $\tilde{h}$ , $\tilde{s}$ .
$b_{mep}$	Presión media efectiva bruta
$h_i$	Entalpía estándar
$i_{mep}$	Presión media efectiva indicada
$m$	Masa total en la cámara de combustión
$m_{a,i}$	Masa de aire inductada
$m_f$	Masa de combustible en la cámara de combustión
$m_r$	Masa residual en la cámara de combustión
$mep$	Presión media efectiva ( <i>mean effective pressure</i> )
$N$	Velocidad de giro del motor
$n_R$	Revoluciones de cigüeñal por ciclo

$p, P$	Presión
$p_0$	Presión de estancamiento antes de la restricción
$p_T$	Presión estática justo después de la restricción
$Q_{HV}$	Poder calórico
$Q_{LHV}$	Poder calórico inferior
$r_c$	Relación de compresión
$s_i$	Entropía estándar
$sfc$	Consumo específico de combustible
$T$	Temperatura
$T_0$	Temperatura de estancamiento antes de la restricción
$U$	Velocidad del fluido
$V$	Volumen
$W_{c,ig}$	Trabajo indicado bruto por ciclo
$W_{c,in}$	Trabajo indicado neto por ciclo
$W_{c,i}$	Trabajo indicado por ciclo
$x_i$	Fracción molar de una especie química “i”
$x_r$	Fracción de gases residuales
0	Valor inicial



## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene la finalidad de obtener un diseño preliminar de la geometría de los sistemas de intercambio de gases del Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante (Toth et al., 2000), 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, presentado por Ingeniero Jorge A. Toth en el año 1996 al Instituto Nacional de la Propiedad Industrial y patentado en el año 1999.

En trabajos anteriores (López, Wild Cañón y Nigro, 2013; López, Wild Cañón y Sarraf, 2016; Toth et al., 2000) 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 promete un funcionamiento más suave del motor, además de una reducción del ruido y desgaste en comparación a motores rotativos tradicionales (Wankel) y reciprocantes. Por otro lado, hay que mencionar que los motores rotativos traen consigo una serie de problemas como la necesidad de introducir aceite a la cámara de combustión para lubricar elementos móviles, el solape de cámaras durante la apertura de los puertos y, en particular al MRCVC,

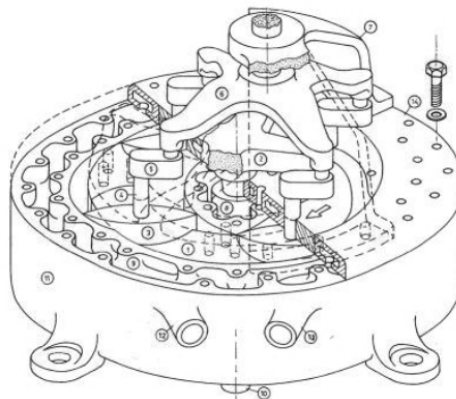


Figura 1.1. Motor Rotativo de Combustión a Volumen Constante

un complejo sistema de sellos ([Álvarez 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 buscó obtener un pre-diseño satisfactorio del sistema poniendo 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 de los puertos en el estator, largos y diámetros de los conductos. No se repara en detalles como la forma de la transición entre las paredes del puerto hacia la cámara, el ángulo al estator o detalles similares.

Se utilizó una serie de herramientas de simulación para la optimización, algunas de las cuales fueron:

1. ICESym ([Nigro et al., 2010](#)), simulador de motores de combustión interna basado en modelos cero-/uni-dimensionales (0D/1D).
2. OpenFOAM ([The OpenFOAM Foundation, 2011–2024](#)), una herramienta libre de CFD ([Computational Fluid Dynamics](#)).
3. Salome ([Open-Cascade et al., 2001](#)), plataforma libre para simulación numérica.

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

El proceso de optimización consta de una primera aproximación utilizando como punto de partida los resultados de trabajos anteriores ([López, Wild 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, analizándose en particular: diámetros y longitudes de conductos y reglaje o posición angular de los puertos.

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

El diseño preliminar de la primera ronda de optimización se volcó en un modelo tridimensional (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 del flujo másico ( $\dot{m}$ ) en estado estacionario para un punto operativo del motor, es decir, para una combinación de diferencia de presión entre puerto y cámara de combustión ( $\Delta P$ ) y el grado de apertura del puerto ( $l_v$ ). El flujo másico se utilizó para medir la eficiencia con la cual escurre el gas a través del puerto, con el objetivo de crear un mapa del coeficiente de descarga ( $C_D$ ) que sea función de las variables mencionadas. Este mapa se utiliza 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 a fin de refinar el diseño obtenido en la primera iteración.

A continuación se describe la organización del presente trabajo. En el segundo capítulo se presenta 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 sobresalientes de 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  $C_D$ , junto con las ecuaciones asociadas. En el tercer capítulo se describen las herramientas computacionales utilizadas en este trabajo. Se presenta el simulador de motores ICESym, el optimizador desarrollado y la integración entre ambos programas. Se incluye de una descripción del funcionamiento del optimizador, los motivos de seleccionar un algoritmo de tipo evolutivo o genético, las

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

En el cuarto capítulo se presentan detalles particulares de las simulaciones realizadas, incluyendo la geometría del motor utilizado y su implementación en ICESym. Además, se detallan la configuración de las flujometrías virtuales realizadas con OpenFOAM, condiciones iniciales, configuración de la herramienta, esquemas de discretización y otros parámetros importantes relacionados a las flujometrías. En el quinto capítulo se presentan los resultados del trabajo para cada una de las etapas correspondientes. Por último, se exponen las conclusiones del trabajo, opiniones finales y una perspectiva a futuro de posibles trabajos a seguir.